



MINISTERIO
DE CIENCIA,
E INNOVACIÓN



INFORME FINAL DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

“RECURSOS Y TECNOLOGÍAS AGRARIAS EN COORDINACIÓN CON LAS COMUNIDADES AUTÓNOMAS”

(Actuales Proyectos de investigación Fundamental Orientada a los Retos de la Sociedad y Acciones Complementarias, y específicamente Reto de Seguridad y Calidad Alimentaria, Actividad Agraria Productiva y Sostenible, Sostenibilidad de los Recursos Naturales e Investigación Marina y Marítima)

CÓDIGO PROYECTO: RTA2017-00088-C03-01

TÍTULO: Nuevos retos en la fertilización orgánica: Calidad de suelo y mejora de la productividad bajo distintos sistemas de manejo (INIA NOCALMES)

INVESTIGADOR PRINCIPAL: Luis Orcaray Echeverría

ENTIDAD SOLICITANTE: Instituto Navarro de Tecnologías e Infraestructuras Agroalimentarias (INTIA)

CENTRO:

FECHA INICIO DEL PROYECTO: 01/01/2018

FECHA FINALIZACIÓN DEL PROYECTO: 31/12/2020 PRORROGADO HASTA 30/09/2021

FECHA INFORME: 09/09/2021

Fecha:
Firma del Investigador Principal: Luis Orcaray Echeverría

Fecha:
Firma del representante legal y sello de la Entidad:



INSTRUCCIONES PARA CUMPLIMENTAR EL INFORME FINAL

De acuerdo con lo indicado en las Resoluciones por las que se hacen públicas las convocatorias de concesión de ayudas para la realización de proyectos y acciones complementarias, en el marco de los Subprogramas o actuaciones correspondientes, se cumplimentará un Informe Final Científico, que deberá presentarse en un plazo no superior a tres meses desde la finalización del proyecto, el que se informará sobre las actividades realizadas de acuerdo con la solicitud. Deberá firmarse por el investigador responsable y por el responsable de la entidad solicitante, y las firmas de los investigadores principales deberán quedar consignadas por parte de la entidad responsable. **No será necesario el envío en papel a INIA, al ser obligatorio el uso de la firma electrónica.**

ESTE INFORME, INCLUYENDO TODOS LOS SUBPROYECTOS EN CASO DE PROYECTOS COORDINADOS, DEBERÁ SER ENVIADO Y FIRMADO DIGITALMENTE POR PARTE DE LA ENTIDAD RESPONSABLE DEL GRUPO INVESTIGADOR. LA ENTIDAD RESPONSABLE DEL GRUPO INVESTIGADOR SE RESPONSABILIZA DEL CONTENIDO DEL INFORME VALIDÁNDOLO A TRAVÉS DE LA FIRMA ELECTRÓNICA AVANZADA. EN CASO DE PROYECTOS COORDINADOS DEBERÁ RELLENARSE UN SOLO INFORME, que incluirá por separado todos los subproyectos, y deberá ser adjuntado en un solo PDF. Las entidades responsables consignarán la firma de los investigadores principales.

EL INFORME DEBE TENER FORMATO PDF PARA PODER SER FIRMADO DIGITALMENTE. LAS ENTIDADES TIENEN OBLIGACIÓN DE MANTENER EN SU PODER LAS FIRMAS ORIGINALES DE LOS INVESTIGADORES.

Asimismo, para el correcto cumplimiento de las condiciones de la convocatoria correspondiente, se enviará, telemáticamente, copia de las publicaciones y otros resultados a los que el proyecto o acción complementaria hubiera dado lugar. En esta documentación deberá mencionarse que han sido financiadas por el INIA, así como el número de referencia de dicho proyecto o acción. Cuando el proyecto o acción haya sido cofinanciado con recursos procedentes de FEDER se deberá citar dicha fuente de financiación.

Este informe debe completarse con la JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA DE GASTOS, que se cumplimentará usando los medios TELEMÁTICOS correspondientes.

El informe final del proyecto consta de:

Informe normalizado

Se cumplimentará en los impresos que acompañan estas instrucciones. En el caso de proyectos coordinados, el informe será presentado por el coordinador del conjunto del equipo investigador, que adjuntará los informes de cada uno de los subproyectos elaborados por sus investigadores principales respectivos, con la conformidad de los representantes legales de las entidades participantes.

De cada uno de los trabajos publicados se remitirá una separata o ejemplar.

NOTA IMPORTANTE DE OBLIGADO CUMPLIMIENTO:

- Junto con el informe final se remitirá un certificado de la Gerencia o Servicio de Contabilidad de la entidad o entidades participantes en el que se especifiquen, detallados por conceptos, los gastos efectuados. Junto con el informe final se remitirá, asimismo, si procede, fotocopia del reintegro al Tesoro Público de los fondos no utilizados.



El informe final del proyecto consta de:

Informe normalizado

Se cumplimentará en los impresos que acompañan estas instrucciones. En el caso de proyectos coordinados, el informe será presentado por el coordinador del equipo investigador, que adjuntará telemáticamente los informes de cada uno de los subproyectos elaborados por sus investigadores principales respectivos, con la conformidad de los representantes legales de las entidades participantes. El informe deberá estar firmado **DIGITALMENTE** por el representante legal de la entidad coordinadora de todos los subproyectos. Cada uno de los subproyectos, además, irán firmados en papel y serán consignados por la entidad coordinadora de los subproyectos.

De cada uno de los trabajos publicados se remitirá una separata o ejemplar.

NOTA IMPORTANTE DE OBLIGADO CUMPLIMIENTO:

- Junto con el informe final se remitirá asimismo, si procede, fotocopia del reintegro al INIA de los fondos no utilizados. Número de CTA INIA: 0182-2370-46-0200203535



EQUIPO INVESTIGADOR

Especificar los siguientes datos de los miembros del equipo investigador: **NOMBRE Y APELLIDOS, DNI, TITULACIÓN ACADÉMICA, CENTRO AL QUE PERTENECE Y DEDICACIÓN (ÚNICA / COMPARTIDA)**

Investigador principal del Proyecto: _____

NOMBRE	DNI	TITULACIÓN ACADÉMICA	CENTRO	DEDICACIÓN
Luis Orcaray Echeverría	72682820Z	DOCTOR ING. AGRÓNOMO	INTIA	COMPARTIDA

Investigadores: _____

NOMBRE	DNI	TITULACIÓN ACADÉMICA	CENTRO	DEDICACIÓN
Iñigo Virto Quecedo	14611512A	DOCTOR ING. AGRÓNOMO	INTIA	COMPARTIDA
Jesús María Mangado Urdaniz	15790963Z	INGENIERO AGRÓNOMO	INTIA	COMPARTIDA
Jesús Amezqueta Alegría	15828418W	INGENIERO AGRÓNOMO	INTIA	COMPARTIDA
Carlos San Martín Izcue	15835580B	INGENIERO AGRÓNOMO	INTIA	COMPARTIDA
Armelle Zaragüeta Vidal	73115082Z	DOCTORANDA (ING. AGRÓNOMA)	INTIA	ÚNICA

Becarios: _____



OBJETIVOS, PLANTEAMIENTO Y DESARROLLO DEL PROYECTO

Las distintas actividades descritas en el plan de trabajo de la investigación a lo largo del periodo de estudio, han avanzado según lo diseñado en el proyecto, cumpliendo todas las tareas superando las múltiples causas que produjeron retrasos en la investigación: i) retraso en la resolución del proyecto, ii) incendio ocurrido el 29-11-2017 en el edificio que aloja al laboratorio del área de Edafología y Química Agrícola, iii) sobrevenidas en la primavera de 2020 tras el decreto de Estado de Alarma (imposibilidad de acceso a los laboratorios y de recogida de muestras).

Así, se han desarrollado conforme al plan establecido las acciones previstas correspondientes al control de calidad del suelo y grano de la parcela denominada INTIA-UPNA METALES PESADOS. En la parcela denominada INTIA-UPNA ECO COBERTERA, se han realizado los muestreos y evaluaciones de los parámetros edáficos para poder realizar la caracterización físico química de la parcela, así como la evaluación de todos los parámetros de rendimiento, balance de nitrógeno y calidad harino-panadera de trigo a lo largo de 3 campañas.

Así, de las tareas relacionadas con parámetros edáficos propuestas para estas dos parcelas, la situación tras estos años es la siguiente:

PARCELA INTIA-UPNA METALES PESADOS

A.G.1. Caracterización físico-química del suelo	Realizado
A.8. Determinación de la retención de agua	Realizado
A.9. Análisis de la porosidad mediante el análisis de láminas delgadas	Realizado
A.10. Determinación de la compactación	Realizado
A.14. Determinación de la concentración de macro y micronutrientes y metales pesados en suelo (pseudototales y disponibles) en suelo, en grano y resto de biomasa en cosecha.	Realizado
A.15. Conductividad hidráulica saturada	Realizado
A.16. Estabilidad de agregados	Realizado
A.17. Fraccionamiento granulodensimétrico de la materia orgánica	Realizado
A.20. Determinación del P disponible (Olsen) y saturación de P	Realizado

Las determinaciones realizadas corresponden con los parámetros físicos y químicos analizados tras el primer muestreo (septiembre 2018). Se realizó un muestreo específico en junio de 2019 para la preparación de láminas delgadas para realizar sus correspondientes analíticas. Siguiendo la rotación, esta última campaña (2020-2021) el cultivo implantado fue trigo y el muestreo anual de suelo se realizó en otoño (como en anteriores años).

PARCELA INTIA-UPNA ECO COBERTERA

A.G.1. Caracterización físico-química del suelo	Realizado
A.1. Determinación de la producción de grano	Realizado
A.3. Determinación del índice de cosecha y de N	Realizado
A.4. Análisis de los parámetros básicos de localidad del grano	Realizado
A.5. Análisis de otros parámetros de calidad del grano	Realizado
A.6. Determinación del nitrógeno mineral del suelo (Nmin)	Realizado
A.8. Determinación de la retención de agua	Realizado
A.10. Determinación de la compactación	Realizado
A.11. Determinación de la biomasa	Realizado
A.13. Cálculo del balance de nitrógeno del sistema suelo-planta	Realizado
A.15. Conductividad hidráulica saturada	Realizado
A.16. Estabilidad de agregados	Realizado
A.17. Fraccionamiento granulodensimétrico de la materia orgánica	Parcialmente Realizado

En esta parcela, las determinaciones realizadas corresponden con los parámetros físico químico analizados tras el primer muestreo (muestras alteradas noviembre 2019 y muestras inalteradas febrero 2020). Sobre estas mismas muestras se realizaron algunos análisis correspondientes al resto de parámetros señalados (estabilidad de agregados y conductividad hidráulica). El resto de parámetros referentes al cultivo, se determinaron campaña a campaña. En esta última campaña (2020-2021) el cultivo implantado fue una mezcla de veza-avena siguiendo así una rotación frecuente en cultivo ecológico (precedente trigo).

A continuación, se muestra un resumen de las actividades realizadas a lo largo del periodo de investigación.

I. Actividades de campo: muestreo de suelos y pruebas de campo

A. PARCELA INTIA-UPNA METALES PESADOS.

El croquis del ensayo se recoge en la siguiente figura, así como los tratamientos ensayados. Se trata de una parcela de secano situada en la cuenca de Pamplona, junto a la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Arazuri, que depura las aguas residuales urbanas de Pamplona y su mancomunidad, y es gestionada por la Mancomunidad de Pamplona.

Desde 1992 se ensayan en esta parcela diferentes dosis y rutinas de aplicación de los lodos de EDAR.

El cultivo es cereal de invierno (cebada/trigo), intercalado cada dos campañas con un cultivo de verano (girasol). La rutina de cultivo corresponde a la zona, con un manejo del suelo convencional con vertedera e incorporación de los restos de cultivo, y preparación de siembra.

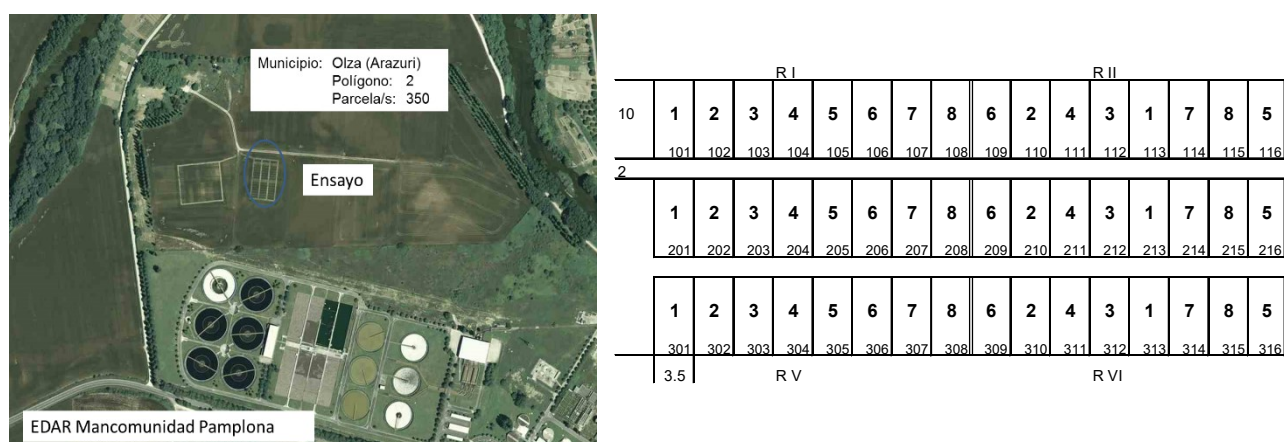


Figura 1. Localización y diseño del ensayo INTIA-UPNA METALES PESADOS.

Como puede observarse en la Figura 1, el ensayo contiene 6 repeticiones con 8 tratamientos resultantes de la combinación de dos factores: dosis de lodo aplicado y frecuencia de aplicación. En la Tabla 1 se resumen los tratamientos realizados en función de la dosis y frecuencia, así como su nomenclatura y número de tratamiento.

Tabla 1: Tratamientos aplicados en el ensayo “INTIA-UPNA metales pesados” de Arazuri.

Tratamiento	Dosis lodos	Frecuencia	Nomenclatura
1	40 t/ha	Todas las campañas	D1F1
2	40 t/ha	Cada 2 campañas	D1F2
3	40 t/ha	Cada 4 campañas	D1F3
4	80 t/ha	Todas las campañas	D2F1
5	80 t/ha	Cada 2 campañas	D2F2
6	80 t/ha	Cada 4 campañas	D2F3
7	Abono mineral	Todas las campañas	Mineral
8	Testigo sin abono	Todas las campañas	Control

Los muestreos realizados para suelo y cultivo durante el periodo de investigación fueron:

Suelo:

- Muestreo para muestra compuesta: Se realizaron con pala o barrena Edelman a dos profundidades (0-15 cm y 15-30 cm), en cinco puntos al azar en cada una de las subparcelas, para las repeticiones I, II, III y IV de los 8 tratamientos (total 64 muestras). En el laboratorio se secaron a temperatura ambiente. Una vez secas, se molieron a 2 mm. Estas muestras se procesaron con vistas a completar las analíticas.

- Muestreos de muestra inalterada: Según la analítica a realizar, las muestras eran tomadas por dos métodos distintos. Para determinar densidad aparente, permeabilidad y capacidad de retención de agua se utilizaron anillos

de 100 cm³ recogidos a dos profundidades (0-15 cm y 15-30 cm) para los 8 tratamientos de las repeticiones I, II, III y IV (total 64 anillos). Para la determinación de láminas delgadas se recogieron muestras de 10 x 5 x 5 cm según el protocolo habitual, cajas de Kubiena de aluminio, en la profundidad correspondiente al horizonte superficial. En este caso se tomaron muestras de los 8 tratamientos en las repeticiones I, II, III (total 24 muestras).

Cultivo:

El muestreo de cultivo se realizó 5 días antes de la cosecha, con una madurez fisiológica completa. Se cogió de cada tratamiento y repeticiones I, II, III y IV, una muestra representativa de la parte aérea del cultivo, evitando los bordes de cada parcela. En el laboratorio se secaron en estufa a 50 °C durante 7 días. Una vez seco, se desgranó con un tamiz de 6 mm para separar el grano de la paja, y una vez separado, se trituró cada parte por separado con un molino de bolas de ágata.

Tabla 2: Muestreos realizados en suelo y cultivo en el periodo de investigación y analítica correspondiente a Arazuri.

AÑO	MES	MUESTREO	ANÁLISIS
2018	Septiembre	- Muestra compuesta - Muestra inalterada	- Parámetros físico-químicos y metales traza. - Densidad aparente y Capacidad Retención Agua
2019	Junio	- Muestra inalterada - Muestra cultivo	- Lámina delgada - Metales traza
2019	Septiembre	- Muestra compuesta	- Fósforo y Potasio
2020	Junio	- Muestra compuesta (Rep. I, II y III) - Muestra inalterada	- Parámetros físico-químicos - Permeabilidad
2020	Septiembre	- Muestra compuesta	- Fósforo y Potasio

Respecto a las medidas de campo, se realizaron las correspondientes a la compactación medida como resistencia a la penetración (penetrómetro Rimik CP20 hasta 60 cm de profundidad, con al menos 5 puntos por subparcela), y de permeabilidad con el permeámetro de Guelph, en dos puntos por subparcela). En ambos casos, las medidas se recogieron en febrero de 2019, en el momento de máxima humedad del suelo, para garantizar la representatividad de las medidas de compactación y de conductividad hidráulica saturada.



Figura 2: Muestreos y medidas tomadas en campo a lo largo del proyecto en la parcela INTIA-UPNA METALES PESADOS.

B. PARCELA INTIA-UPNA ECO COBERTERA

Tras la modificación inicial del diseño experimental para poder aumentar el número de tratamientos a estudio incluyendo un nuevo factor (momento de aplicación del fertilizante), se ha seguido con el planteamiento iniciado la pasada campaña.

La parcela está ubicada en la finca experimental que INTIA gestiona en Sartaguda (Navarra) y que cuenta con certificación ecológica. El ensayo está enmarcado en una rotación de tres años trigo-leguminosa-trigo en ecológico con una superficie de 1760m² (40 m x 44 m) en regadío por inundación. Tiene un diseño estadístico de bloques al azar con 4 repeticiones y dos factores: tipo de fertilizante orgánico comercial (FO) y momento de aplicación. La combinación de estos factores ofrece 6 tratamientos a los cuales se les añadió 1 testigo.

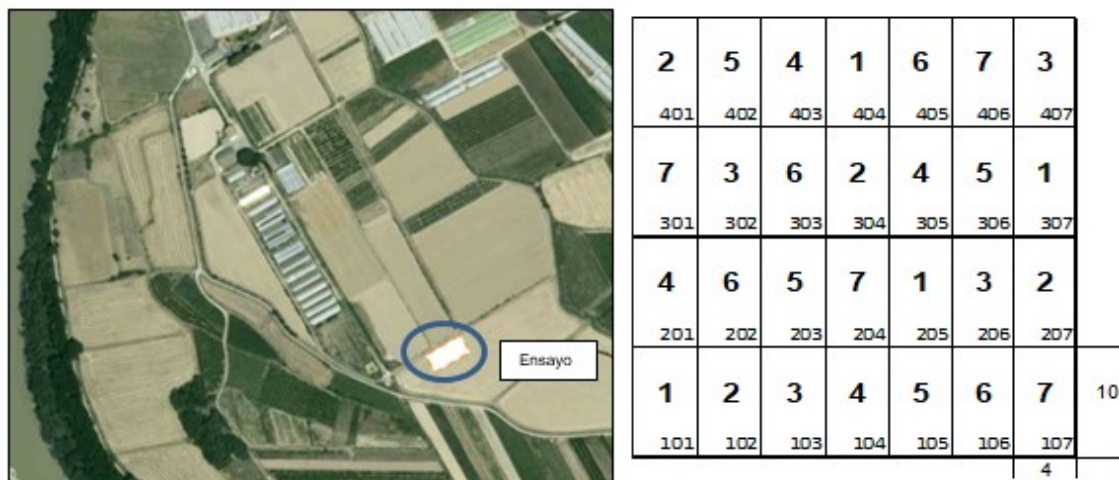


Figura 3: Localización y diseño del ensayo INTIA-UPNA Eco cobertera

Los FO se escogieron por su uso normalizado en la zona y fueron LABINOR N10, Ecofem super (ambos pellets) y Cal Meleon Booster (foliar). Los distintos momentos de aplicación se determinaron en función del estado fenológico del cultivo: ahijado, encañado y espigado. La dosis total de nitrógeno aplicada en campaña de trigo en los FO formato pellet fue de 75 unidades fertilizantes de nitrógeno (UFN) y 0.64 UFN en el formato foliar, aplicándose el 100% en cobertera. El año con leguminosa se aplicó 0 UFN en todos los tratamientos.

Tabla 3: Tratamientos aplicados en el ensayo "INTIA-UPNA Eco cobertera" de Sartaguda en la campaña con trigo.

Tratamiento	Fertilizante Orgánico	Formato	Momento aplicación	% Aplicación UFN cobertera	UFN aplicadas en total
1	Testigo (sin abono)	-	-	0	0
2	LABINOR N10	pellet	Ahijado	100	75
3	Ecofem super	pellet	Ahijado	100	75
4	Cal Meleon Booster	foliar	Encañado y Espigado	50 / 50	0.64 (0.32 + 0.32)
5	LABINOR N10	pellet	Encañado	100	75
6	Ecofem super	pellet	Encañado	100	75
7	Cal Meleon Booster	foliar	Encañado	100	0.64

Los muestreos realizados para suelo y cultivo durante el periodo de investigación fueron:

Suelo:

- Muestreo para muestra compuesta: Se realizaron con barrena Edelman a tres profundidades (0-5 cm, 5-15 cm y 15-30 cm), en tres puntos al azar en cada una de las subparcelas, para las repeticiones I, II, III y IV de los 7 tratamientos (total 84 muestras). En el laboratorio se secaron a temperatura ambiente. Una vez secas, una parte se molió a 2 mm y otra parte se tamizó a 6 mm. Estas muestras se procesaron con vistas a realizar las analíticas.

- Muestreos de muestra inalterada: Se utilizaron anillos de 100 cm³ recogidos a tres profundidades (0-5 cm, 5-15 cm y 15-30 cm) para los 7 tratamientos de las repeticiones I, II, III y IV (total 84 anillos).

-Muestreos de nitrógeno mineral (Nmin): Se realizaron con barrena Edelman a tres profundidades (0-15 cm, 15-30 cm, 30-60 cm), en tres puntos al azar en cada una de las subparcelas, para las repeticiones I, II, III y IV de los 7 tratamientos (total 84 muestras).

Cultivo:

El muestreo de cultivo se realizaba a mano excepto en pre cosecha que se utilizó la oz. Se tomaba 1m² de planta de cada subparcela para las repeticiones I, II, III y IV de los 7 tratamientos (total 28 muestras).

Tabla 4: Muestreos realizados en suelo y cultivo en el periodo de investigación y analítica correspondiente a Sartaguda.

AÑO	MES	MUESTREO	ANÁLISIS
2019	Abril	- Nmin - Cultivo	- Nitratos y amoníaco - N total y biomasa
2019	Junio	- Cultivo	N total y biomasa
2019	Octubre	- Muestra compuesta - Nmin	- Análisis físico químicos - N total y biomasa
2020	Febrero	- Muestra inalterada - Nmin - Cultivo	- Densidad aparente y permeabilidad - Nitratos y amoníaco - N total y biomasa
2020	Marzo	- Nmin - Cultivo	- Nitratos y amoníaco - N total y biomasa
2020	Julio	- Nmin - Cultivo	- Nitratos y amoníaco - N total y biomasa
2020	Octubre	- Muestra compuesta - Nmin	- Análisis físico químicos - Nitratos y amoníaco
2021	Junio	- Nmin	- Nitratos y amoníaco

Respecto a las medidas de campo, se realizaron las correspondientes a la compactación medida como resistencia a la penetración (penetrómetro Rimik CP20 hasta 60 cm de profundidad, con al menos 5 puntos por subparcela). Las medidas se recogieron en febrero de 2020, en el momento de máxima humedad del suelo, para garantizar la representatividad de las medidas de compactación.



Figura 4: Muestreos y medidas tomadas en campo a lo largo del proyecto en la parcela INTIA-UPNA Eco cobertera.

II. Actividades de laboratorio y tratamiento de datos

Las analíticas señaladas en la lista que encabeza este epígrafe se realizaron en el laboratorio de Edafología y Química Agrícola de la UPNA, con la excepción de los metales pesados (laboratorio de suelos ETSEA-UdL en Lleida), y la determinación de N mineral de suelo y biomasa que se determinaron en el laboratorio de NASERTIC.

Las láminas delgadas se prepararon en el laboratorio de Micromorfología de Suelos de la ETSEA-UdL, mientras que el análisis de imagen se realizó en el laboratorio de la UPNA y en el laboratorio de micromorfología de la ETSEA-UdL. En este contexto, se desarrolló una versión actualizada del software utilizado para el estudio específico de la porosidad de suelos en lámina delgada. Esto permitió realizar un análisis exhaustivo de actividad no prevista inicialmente, y que proporciona información más relevante sobre las características físico químicas del suelo, y es de utilidad para la evaluación de otros parámetros analizados, como la retención de agua.

El fraccionamiento de la materia orgánica se realizó únicamente en base a la extracción de la materia orgánica particulada < 53 μm . El tiempo limitado debido a las circunstancias externas (incendio del laboratorio y COVID 19) han supuesto que, para la parcela INTIA-UPNA METALES PESADOS, el fraccionamiento más avanzado esté en curso. En la parcela INTIA-UPNA ECO COBERTERA, los resultados obtenidos en el fraccionamiento preliminar han demostrado el escaso interés de profundizar en modelos más complejos, por el escaso tiempo transcurrido desde la implantación del ensayo.

Se ha realizado el análisis estadístico completo de los datos analizados mediante el Software R.



MINISTERIO
DE CIENCIA,
E INNOVACIÓN



En conclusión, el cumplimiento de los objetivos del proyecto ha sido satisfactorio aun con los retrasos sufridos con respecto al plan de trabajo inicial (retraso en la concesión y lanzamiento de los ensayos, falta de disponibilidad del laboratorio, y la declaración de estado de alarma). A lo largo de estos años, se ha conseguido cumplimentar casi el 100% de los objetivos exceptuando ciertas analíticas complementarias en cuanto a caracterización de los suelos estudiados (fraccionamiento de la Materia orgánica total) pero habiendo realizado otras de mayor interés.

Los muestreos de cultivo y suelo previstos tanto para la parcela INTIA-UPNA-Metales pesados, como para la parcela UPNA-INTIA-Eco Cobertera, se han realizado conforme a lo previsto.

RESULTADOS ALCANZADOS EN EL PROYECTO

En el caso de no haber sido alcanzados todos los resultados previstos, indíquese las causas.

A. PARCELA INTIA-UPNA METALES PESADOS

I. Caracterización físico-química del suelo (Objetivo (Obj) A.G.1):

La parcela experimental en donde se ha realizado el estudio se sitúa sobre un Cambisol Calcárico (FAO-UNESCO, 1997), con una textura franco-arcillo-limosa y más del 16% de carbonatos en el horizonte superior (0-30 cm). Las principales características físico químicas de este horizonte aparecen en la Tabla 5. Se trata de un suelo bien drenado, sin problemas de profundidad efectiva en el horizonte superficial y con un uso agrícola de secano durante décadas.

Tabla 5. Características físico - químicas del suelo ensayado en Arazuri (0–30 cm). Los valores se indican como media $\pm$ desviación estándar (n = 3).

Características Físico Químicas	
pH	8,50 $\pm$ 0,05
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-3}$ a 25 °C)	220,12 $\pm$ 10,71
Densidad aparente (g cm^{-3})	1,56 $\pm$ 0,04
Carbonatos (%)	16,59 $\pm$ 1,35
Arcillas (%)	27,86 $\pm$ 0,65
Carbono Orgánico (%)	1,35 $\pm$ 0,02
P total (ppm)	867,0 $\pm$ 67,6
K total (ppm)	9589,8 $\pm$ 387,7

Para la realización de estas analíticas, el muestreo de suelo se realizó en septiembre, finalizado el ciclo del cultivo anterior, y antes de la aplicación de lodo para la siguiente campaña. A continuación, se muestran las figuras de la caracterización de los parámetros señalados en la Tabla 5, diferenciado por tratamientos. Los parámetros (tanto físicos como químicos) incluidos específicamente en los objetivos (capacidad de retención de agua, análisis de la porosidad mediante láminas delgadas, estabilidad de la estructura, conductividad hidráulica, concentración de metales pesados, y fosforo) se analizarán por separado.

En la Figura 5 por un lado, se observan diferencias significativas en la conductividad eléctrica en los primeros 30 cm de suelo. El tratamiento que recibe mayor dosis con mayor frecuencia contiene una mayor concentración de sales solubles respecto a los otros tratamientos. Por el contrario, este mismo tratamiento, tiene un pH significativamente menor. Esto se podría esperar ya que la adición de lodos a largo tiempo tiende a acidificar el suelo (Urra et al., 2019). Esta idea se corrobora con unos valores de pH máximos en los tratamientos que no reciben lodos (control y fertilización mineral).

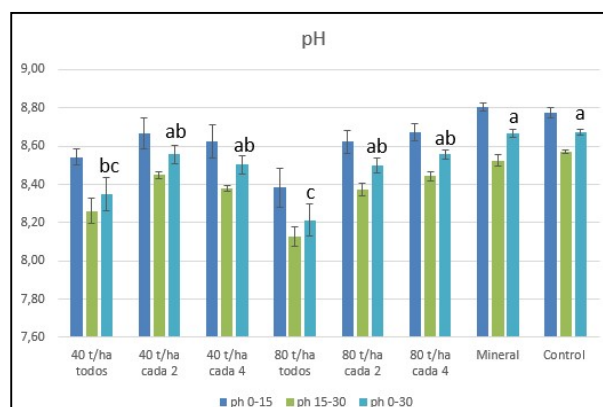
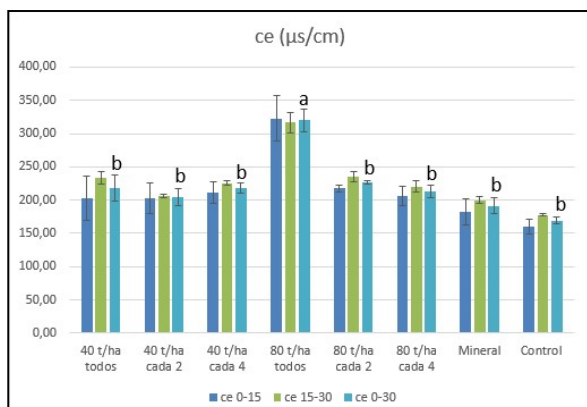


Figura 5: Valores de conductividad eléctrica (izda.) y pH (dcha.) diferenciados por profundidades (0-15; 15-30; 0-30 cm) en función del tratamiento en la parcela INTIA-UPNA-Metales pesados. Medias y errores estándar (n = 4); p < 0.05; letras para grupos homogéneos según Duncan.

El estudio de la densidad aparente mostró homogeneidad entre parcelas independientemente del tratamiento recibido, así como la porosidad total, debido probablemente a la gran variabilidad de este parámetro.

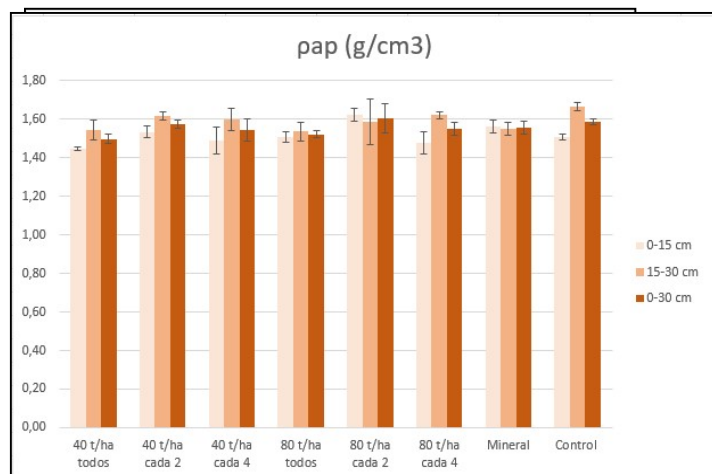
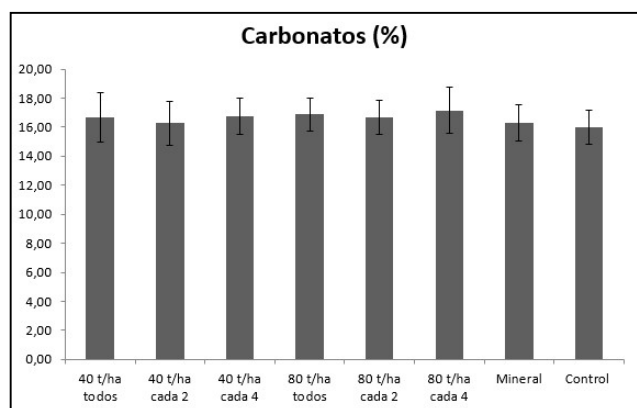
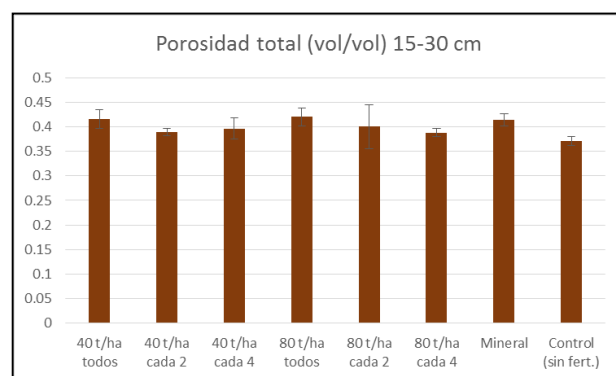


Figura 6. Valores de densidad aparente (arriba) y porosidad total a profundidad de estudio (0-15 y 15-30 cm) (dcha) en función del tratamiento en la parcela INTIA-UPNA-Metales pesados. Medias y errores estándar ($n = 4$); $p < 0.05$; letras para grupos homogéneos según Duncan.



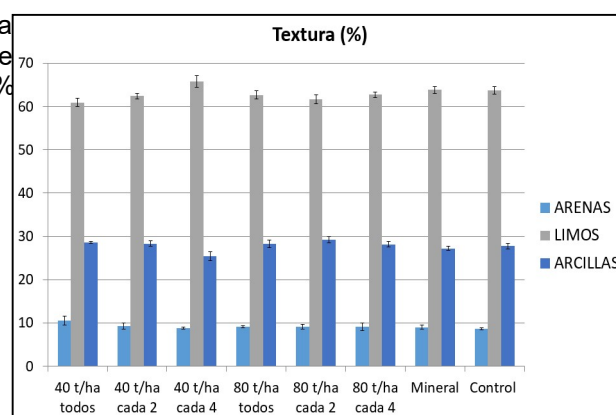
En toda la parcela, no encontrando diferencias significativas en

Con un valor próximo al 16% de carbonatos, estos pueden interferir con ciertos parámetros como consecuencia de la posible formación de diferentes asociaciones órgano minerales tras la aplicación repetida de enmiendas orgánicas como las de este estudio.

Figura 7. (Izq) Contenido de carbonatos en la profundidad de estudio más superficial (0-15 cm) en función del tratamiento en la parcela INTIA-UPNA-Metales pesados. Medias y errores estándar ($n = 3$); $p < 0.05$; letras para grupos homogéneos según Duncan.

En relación a los parámetros físicos estudiados para la cara contenida de arenas, limos y arcillas que determinan la clase de suelo en cada porción de elementos finos; arenas 9,2% - limos 63,0%

Figura 8. (Dcha) Contenido arenas, limos y arcillas en la profundidad más superficial (0-15 cm) en función del tratamiento en la parcela INTIA-UPNA-Metales pesados. Medias y errores estándar ($n = 3$); $p < 0.05$; letras para grupos homogéneos según Duncan.



En cuanto al K disponible, solo se observaron diferencias en una de las cuatro profundidades estudiadas (15-30 cm), resultado obtener un mayor contenido en K el tratamiento con 80 t/ha cada año respecto al control en la campaña 19. Esta diferencia, sin embargo, no se mostró en el contenido de todo el perfil (0-90). Por otro lado, se comparó

los valores de K total con K disponible en la campaña 20 en los primeros 30 cm. En este caso, se observaron diferencias significativas en ambos valores. Por un lado, el K disponible a esta profundidad siguió la misma tendencia que a 0-90 cm pero en K total, el valor mínimo se observó en el tratamiento de 80 t/ha cada 4 años. Esto hace suponer que, aunque el contenido de K aportado por los lodos a pesar de ser bajo, está parcialmente disponible para el cultivo.

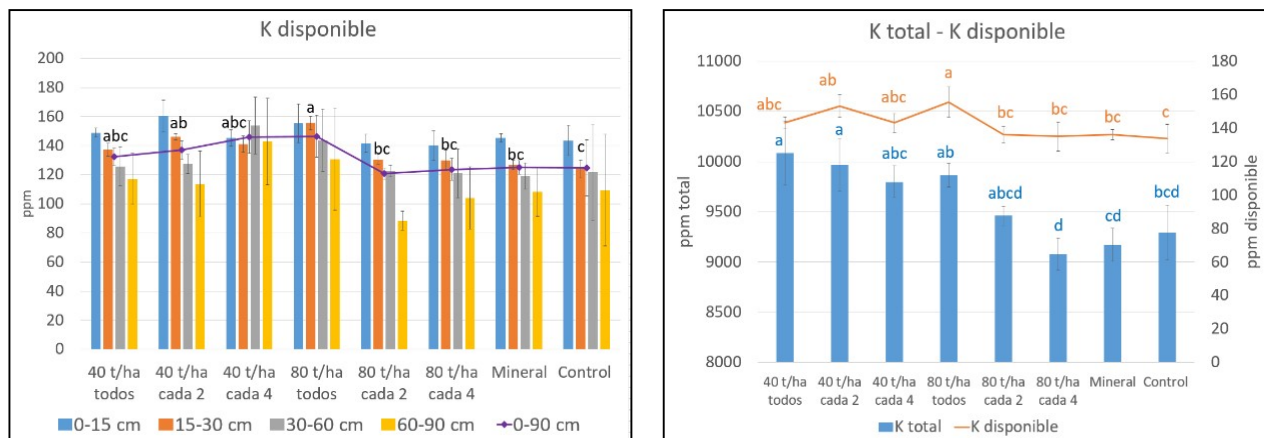


Figura 9. Contenido de K disponible en distintas profundidades de estudio (izq) y comparación de K total con K disponible a profundidad de labranza (0-30 cm) (dcha.) en función de los distintos tratamientos en la parcela INTIA-UPNA-Metales pesados. Medias y errores estándar (n = 4); p < 0.05; letras para grupos homogéneos según Duncan).

II. Determinación de la retención de agua (Obj. A.8):

Se muestran los resultados obtenidos en relación a la retención de agua. La Figura 10 muestra el contenido de agua almacenada en el horizonte labrado en los dos puntos característicos estudiados (capacidad de campo, considerada equivalente a la retención a -33 KPa), y punto de marchitez permanente (correspondiente a -1500 KPa). El agua retenida entre estos dos puntos se considera equivalente a la capacidad de retención de agua disponible para las plantas (CRAD), y se estudió tanto en concentración másica (g/g) como en volumen (L/m²).

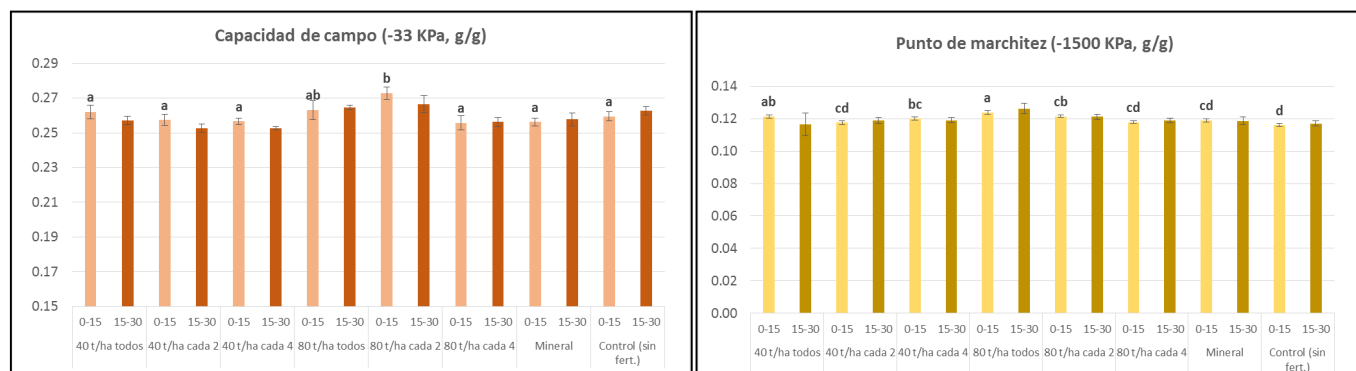


Figura 10. Valores de retención de agua en masa (g/g) en la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente en la parcela INTIA-UPNA-Metales pesados, en profundidades de estudio (0-15 cm y 15-30 cm) para cada tratamiento. Medias y errores estándar (n = 4); p < 0.05; letras para grupos homogéneos según Duncan).

A capacidad de campo los tratamientos con mayor aporte de lodos (80 t/ha) todos los años y cada dos años, mostraron mayor capacidad que el resto. Esto podría interpretarse como una contribución de estos aportes a la retención. Las diferencias observadas en el punto de marchitez permanente, sin embargo, que muestran una tendencia a menor humedad en este punto en el control que en las parcelas con la máxima dosis, abren cuestiones sobre el origen de estas diferencias. Si bien en el caso de la capacidad de campo, pueden relacionarse la porosidad con la retención, en el caso del punto de marchitez, normalmente la retención se asocia a la textura. Sin embargo, al no existir diferencias texturales entre tratamientos, podría pensarse en una interacción entre la presencia de materiales orgánicos procedentes de las enmiendas y la retención de agua también a potenciales bajos.

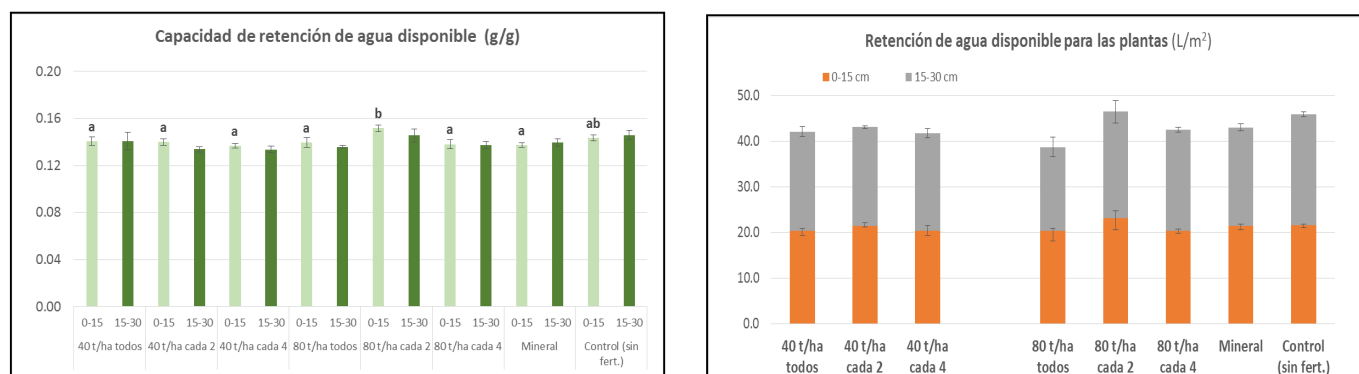


Figura 11. Valores de retención de agua disponible para las plantas en masa (g/g) y en volumen (L/m²) en la parcela INTIA-UPNA-Metales pesados, en profundidades de estudio (0-15 cm y 15-30 cm). Medias y errores estándar (n = 4); p < 0.05; letras para grupos homogéneos según Duncan).

En cualquier caso, las diferencias observadas resultaron en algunas diferencias en CRAD en peso, situando un valor más elevado en las parcelas con una carga alta de lodo (80 t/ha cada 2 años). Estas diferencias sin embargo no se tradujeron en diferencias en volumen (L/m²) debido fundamentalmente a la variabilidad observada en la densidad aparente (Figura 6).

III. Análisis de la porosidad mediante el análisis de láminas delgadas (Obj. A.9):

El estudio de la microestructura y la porosidad se realizó en el otoño de 2020 y permitió establecer algunos aspectos en relación al desarrollo de porosidades de diferente tipología en función del tratamiento. También permitió estudiar en detalle la fábrica del suelo (disposición de sus diferentes componentes en su posición real en el suelo), así como la porosidad y otros elementos a partir de herramientas de análisis de imagen. Los parámetros de campo (un valor para cada imagen e incluidos los bordes de los poros) fueron el área total de los poros y el perímetro total de los poros. Los parámetros morfológicos (un valor por poro y excluyendo el corte de poro por los bordes del marco) fueron circularidad, solidez y diámetro equivalente.

La descripción cualitativa de las diferentes tipologías y características de los poros del suelo mostró que la aplicación de lodos indujo cambios relacionados con la estructura de los poros del suelo. Se observó que la aplicación de lodos a largo plazo cambió la microestructura del suelo (tipo “crumb” y “sub-angular blocky”, estructuras favorables a prácticas agrícolas, mientras que los tratamientos con fertilización mineral mostró una microestructura laminar y “apedal” con menor actividad faunística. El tratamiento testigo mostró una microestructura de “Crumb” y “Apedal channel”, con abundancia de actividad faunística.

En la distribución del tamaño de los poros, por su diámetro equivalente, los tratamientos con lodos tienen una mayor proporción de poros en general, sin embargo, se observa lo contrario en la porosidad total. Estas observaciones permitieron entender que los cambios que resultan en una mayor porosidad general cuando se usa fertilizantes minerales frente a diferentes cantidades de lodos para la fertilización, o incluso sin fertilización (tratamiento control) también estaban relacionados con el desarrollo de un tipo diferente de porosidad: fertilización mineral daría como resultado en mayor abundancia de fisuras, mientras que bajo la aplicación de lodos se encontraron diferentes categorías de poros, más relacionados con la biofauna y la actividad radicular. Incluso, en las láminas delgadas de los tratamientos con lodos fueron encontrados vestigios fosiles de la actividad de lombrices, que corrobora los resultados del análisis de imagen. Curiosamente, el uso de no fertilización tuvo una respuesta intermedia, con algunas evidencias de poros que eran más similares a los de los tratamientos que recibieron lodos que a los de fertilización mineral. Esto sugiere que la fertilización mineral a largo plazo daría como resultado una mayor degradación estructural del suelo que ninguna fertilización en el suelo estudiado. Las consecuencias de esto pueden resultar en un peor comportamiento del suelo en términos de transmisión de agua y / o actividad biológica.

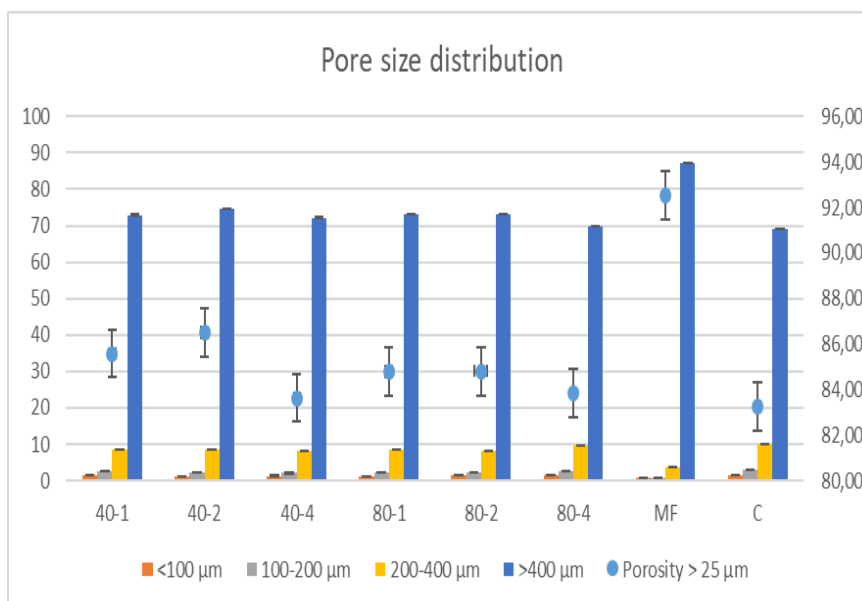


Figura 12. Valores de porosidad total y distribución (%) de tamaño de poros, a partir del estudio de láminas delgadas (0-15 cm), en función del tratamiento en la parcela INTIA-UPNA-Metales pesados. Medias y errores estándar (n = 3); p < 0.05; letras para grupos homogéneos según Duncan.

IV. Estabilidad de agregados (Obj A.16):

El estudio de este parámetro especialmente a nivel de superficie, cobra especial importancia por su relación con los problemas de encostramiento frecuentes en este tipo de suelos. Sin embargo, la aplicación repetida de materiales orgánicos en suelos del tipo estudiado en este ensayo, puede tener consecuencias en su configuración física al interferir con el desarrollo de la estructura, que si bien tiene sus particularidades en suelos con abundantes carbonatos alcalinotérreos (Fernández-Uglade et al., 2011; Rowley et al., 2018), puede responder a esta aplicación tanto con modificaciones en la configuración y estabilidad de la estructura como consecuencia de la formación de diferentes asociaciones complejos órgano-minerales, como en relación a la actividad biológica. Así, parece existir una correlación entre los tratamientos con mayor frecuencia y dosis (los cuales presentan una acumulación significativa de C orgánico total y particulado según se describe más abajo en las Figuras 14 y 15), y una estabilidad de la estructura menor (MWD). Aunque el porcentaje de estabilidad de los agregados (WSA) no mostró tan claramente este hecho, también se observaron valores más bajos de agregados estables al agua en algunos de mayor frecuencia de aportes.

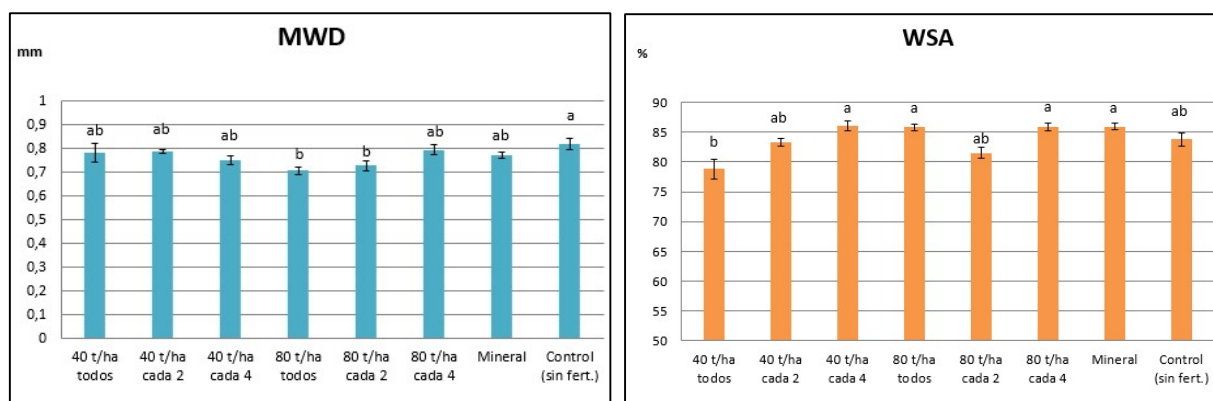


Figura 13. Valores de estabilidad de la estructura en la profundidad superficial (0-15 cm) en función del tratamiento en la parcela INTIA-UPNA-Metales pesados. Diámetro del peso medio de las partículas (MWD) (izda.) y proporción de agregados estables al agua (WSA) (dcha.). Medias y errores estándar (n = 4); p < 0.05; letras para grupos homogéneos según Duncan.

Esta aparente contradicción supuso un estudio de la conductividad eléctrica asociada a estos tratamientos (Figura 5) en donde se apreció un enriquecimiento en sales solubles correspondientes a la dosis y frecuencia. Esto

puede explicar parcialmente los valores de estabilidad de la estructura, ya que se vio que la acumulación era menor en el control sin fertilización y con fertilización mineral que en todos los tratamientos que reciben lodos.

V. Fraccionamiento de la materia orgánica (Obj. A. 17)

Dentro de los parámetros analizados para investigar las consecuencias del aporte de diferentes dosis de lodos de depuración de EDAR al suelo de la parcela de estudio, se han estudiado tanto la concentración y almacenamiento de C orgánico total, como la distribución de la materia orgánica en dos fracciones funcionalmente complementarias: la materia orgánica lábil (identificada en este caso como la materia orgánica no ligada a la fracción mineral), y la asociada a la fracción mineral. La primera fracción se ha identificado en estudios previos en la zona (Imaz et al., 2010; Apesteguía et al., 2017), como un indicador precoz de los cambios ocurridos en el suelo como consecuencias de cambios en el manejo que supongan un cambio en la entrada de materiales orgánicos (Figura 4).

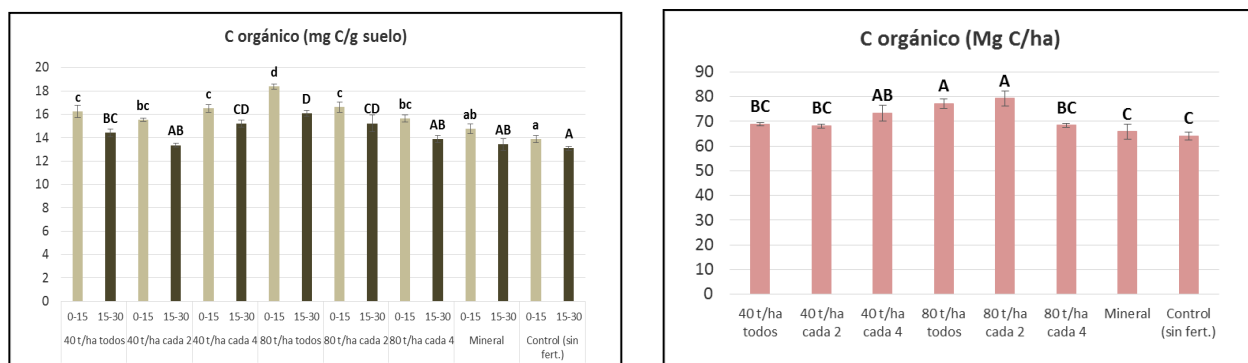


Figura 14. Valores de C orgánico en concentración (mg/g) en profundidades de estudio (0-15 cm y 15-30 cm), y en stock almacenado (Mg C/ha) en todo el espesor (0-30 cm) en la parcela INTIA-UPNA-Metales pesados. Medias y errores estándar (n = 4); p < 0.05; letras para grupos homogéneos según Duncan).

Según se observa en la Figura 14, la relación entre la aplicación de lodos y la acumulación de materia orgánica es directa, y afecta a las dos profundidades estudiadas. Así, se observó una acumulación de 15 t/ha de C orgánico entre el control sin fertilización y el tratamiento con el máximo stock observado (80 t/ha cada 2 años, equivalente al tratamiento de máxima dosis (80 t/ha cada año).

En relación a la naturaleza de la materia orgánica acumulada, la siguiente figura muestra la acumulación de C lábil y su relación con el C total almacenado en cada tratamiento.

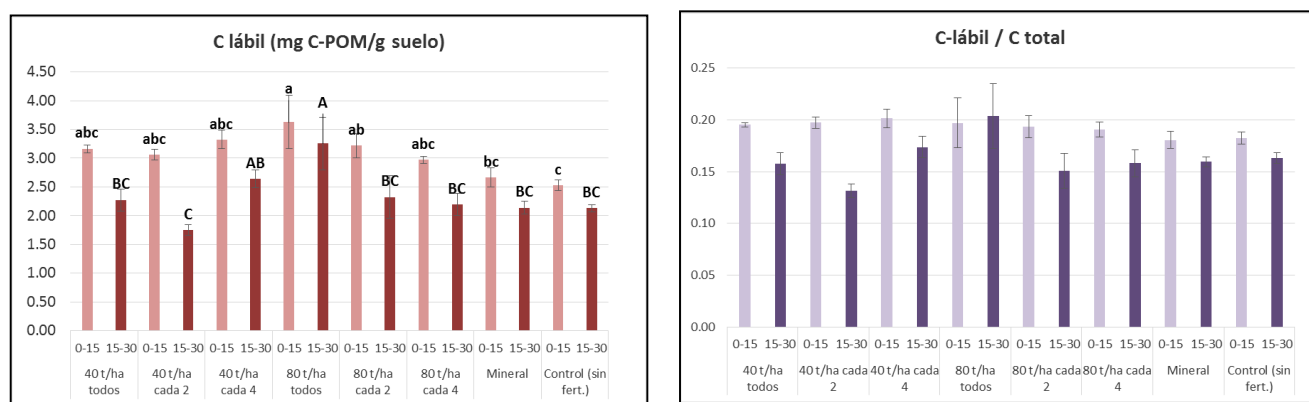


Figura 15. Valores de C orgánico lábil en concentración (izquierda) y en proporción al total (derecha) en profundidades de estudio (0-15 cm y 15-30 cm), en la parcela INTIA-UPNA-Metales pesados. Medias y errores estándar (n = 4); p < 0.05; letras para grupos homogéneos según Duncan).

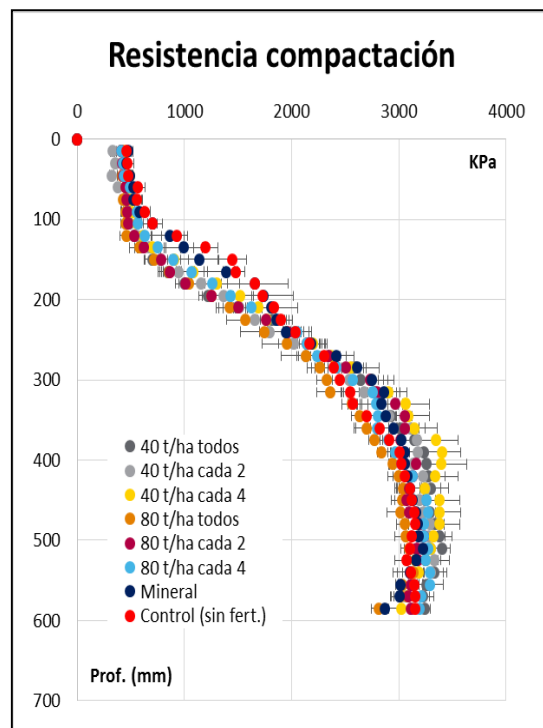
Por un lado, el comportamiento de la fracción lábil siguió, con mayores diferencias, el del C orgánico total, lo que confirma esta fracción como un indicador especialmente sensible en estos casos. Sin embargo, la proporción de esta fracción sobre el total mostró una alta variabilidad e inexistencia de diferencias significativas entre tratamientos. Este resultado plantea cuestiones sobre el origen de este enriquecimiento en fracción lábil, que

podría estar relacionado con las entradas de los restos de cultivo, y no sólo (o no relacionada) con el aporte de materia orgánica en las enmiendas correspondientes.

VI. Determinación de la compactación (Obj A.10):

Se observaron diferencias en relación a la compactación en las parcelas de estudio, manifestadas en particular en el horizonte labrado: los tratamientos que reciben cargas mayores de lodos de depuradora, presentan una menor compactación que el control o el fertilizado con abonos minerales. Todas las parcelas presentan además la forma característica del perfil de compactación correspondiente a una suela de labor. Esto se corresponde con el tipo de manejo del suelo con laboreo convencional, y se manifiesta en un aumento brusco de la resistencia a la penetración entre los 20 y 30 cm de profundidad. A partir de esta profundidad, las diferencias entre tratamientos desaparecen, o se hacen menos evidentes (hasta los 60 cm de profundidad medidos).

Figura 16. (Dcha.) Valores de resistencia a la compactación en función del tratamiento en la parcela INTIA-UPNA-Metales pesados. Medias y errores estándar ($n = 4$).



VII. Conductividad hidráulica saturada (Obj A.15):

Para poder determinar este valor junto a la permeabilidad del suelo, se utilizó un permeámetro de carga constante que se encuentra en el laboratorio de edafología de la UPNA. A pesar de que el ensayo de carga constante es un método para determinar la conductividad hidráulica de un suelo en laboratorio, capaz de medir valores hasta de $k > 10^{-4}$ m/s, la textura del suelo de ensayo resultó en limitaciones para realizar la medida, por procesos de hinchamiento de las muestras. Así, los resultados obtenidos (no mostrados), no fueron representativos de la permeabilidad del suelo de la parcela de Arazuri.

VIII. Determinación de la concentración de macro y micronutrientes y metales pesados en suelo (pseudototales y disponibles) en suelo, en grano y resto de biomasa en cosecha (Obj A.14):

Debido al interés del estudio acumulativo de los metales pesados (MP) en el suelo y cultivo, a partir de las dosis totales aportadas en cada tratamiento durante los 26 años del estudio, se establecieron 5 rangos de lodo de depuradora (LD) acumulado: 0 Mg ha^{-1} (Fertilización mineral y Control), 250 Mg ha^{-1} (40 Mg ha^{-1} cada 4 años), el comprendido entre 520 Mg ha^{-1} y 560 Mg ha^{-1} (40 Mg ha^{-1} cada 2 años y 80 Mg ha^{-1} cada 4 años) denominado 500 Mg ha^{-1} , 1040 Mg ha^{-1} (40 Mg ha^{-1} cada año y 80 Mg ha^{-1} cada 2 años) denominado 1000 Mg ha^{-1} y 2080 Mg ha^{-1} (80 Mg ha^{-1} cada año) denominado 2000 Mg ha^{-1} .

En **suelo** los resultados del estudio ANOVA indicaron para Cu, Cr, Hg, Zn y Ni diferencias significativas en la **concentración total** en el suelo en función del tratamiento fertilizante aplicado (Figura 17). El Cu, Cr y Hg presentaron una diferencia significativa entre el tratamiento control y el tratamiento correspondiente a 2000 Mg ha^{-1} de LD, obteniendo la menor y mayor concentración respectivamente. La concentración en suelo de Ni y Zn presentó diferencia significativa entre los tratamientos que no habían recibido LD (control y fertilizante mineral) y los que sí habían recibido. En el caso del Zn, además, en el tratamiento fertilizante de 2000 Mg ha^{-1} de LD, la concentración aumentó de manera significativa respecto al resto de tratamientos con algún aporte de lodo.

No se encontraron diferencias significativas en la concentración del suelo para el Pb, Cd, y Mn en función de los distintos tratamientos fertilizantes. El estudio complementario basado en el contraste entre tratamientos con y sin

LD, confirmó los resultados obtenidos de la primera prueba. Este análisis, para la concentración total de Cu, Cr, Hg, Ni y Zn, reveló valores más altos en los tratamientos que habían recibido aplicaciones de LD que en aquellos que no habían recibido (control y fertilización mineral).

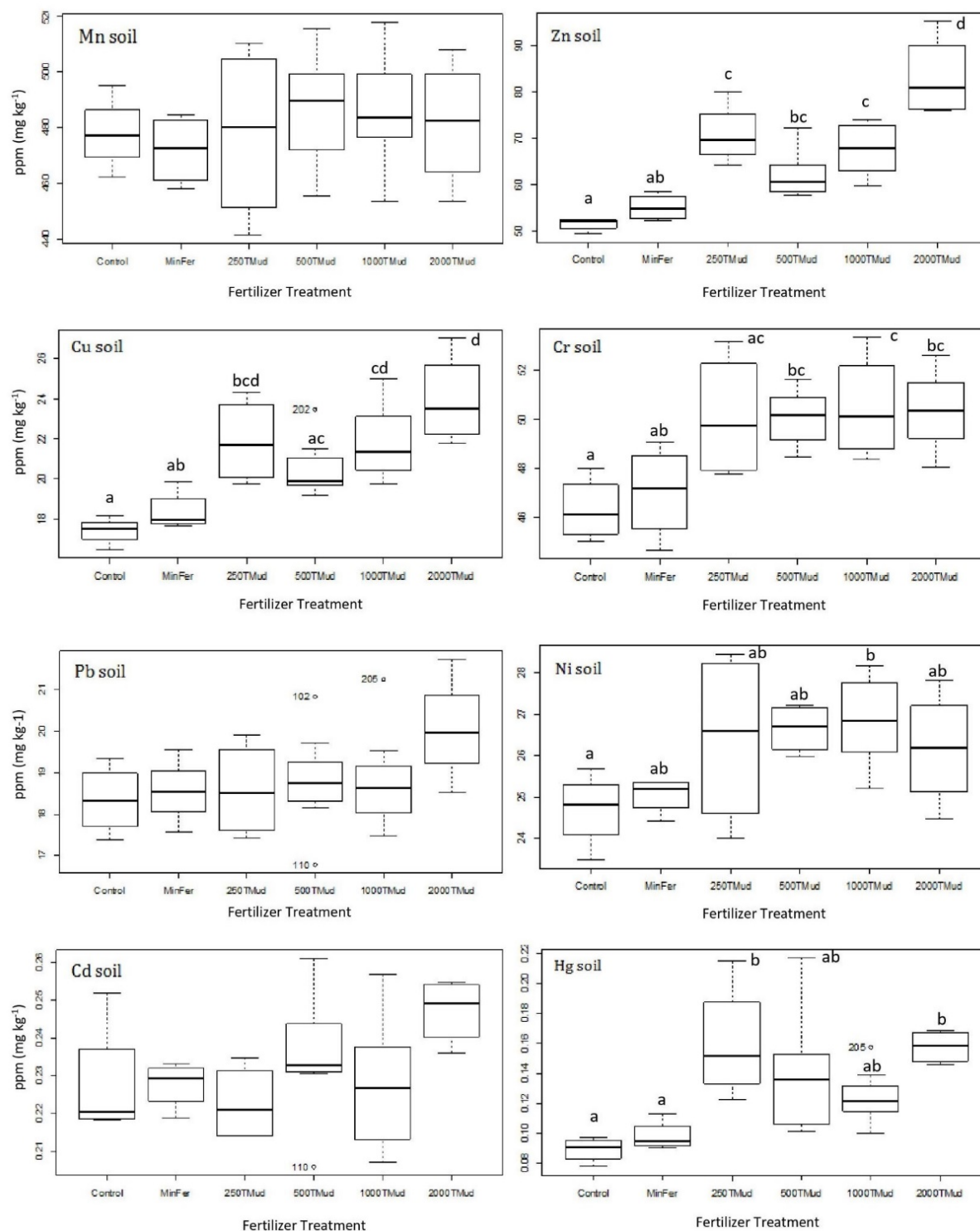


Figura 17. Gráfica de caja y bigotes de la concentración total de Mn, Zn, Cu, Cromo (Cr), Pb, Ni, Cd y Hg existentes en la profundidad 0-30 cm, en función del tratamiento fertilizante recibido. Parte superior e inferior de la caja = percentiles 75 y 25, respectivamente. Parte superior e inferior de los bigotes = percentiles 90 y 10, respectivamente. Línea en el interior de la caja = mediana (percentil 50). Puntos más allá de los bigotes = valores atípicos. Letras diferentes indican diferentes grupos homogéneos según el test de Tukey. Los metales pesados están representados de mayor a menor concentración presente en el lodo de depuradora.



En cuanto a las concentraciones **biodisponibles** en el suelo, se determinaron mediante el extractante DTPA. Los resultados mostraron cómo en Cd, Ni, Pb, Zn y Cu, la concentración biodisponible aumentó en función del tratamiento fertilizante (Figura 18). El estudio estadístico complementario detectó diferencias significativas para Mn. En Cd y Ni se encontró diferencia significativa entre el tratamiento control y 2000 Mg ha⁻¹ LD acumulado. Para el Pb y Zn se observó una diferencia significativa entre los tratamientos que no recibieron lodo (control y fertilización mineral) y los que sí recibieron. Para ambos MP la cantidad mínima aplicada supuso un aumento significativo en la concentración extraíble mediante DTPA. En el caso de Zn extraído con DTPA, en el tratamiento fertilizante de 2000 Mg ha⁻¹, la concentración biodisponible aumentó significativamente. Los valores observados en este análisis para el Cu mostraron dos diferencias significativas; entre los tratamientos de 0 Mg ha⁻¹ (control y fertilización mineral), los tratamientos comprendidos entre 250 Mg ha⁻¹ a 1000 Mg ha⁻¹ y el tratamiento de 2000 Mg ha⁻¹. El estudio entre tratamientos con y sin aplicación de LD encontró que la concentración de Mn extraído con DTPA fue mayor en las parcelas que no habían recibido LD (control y fertilización mineral), respecto a las que si habían recibido. Este mismo análisis confirmó los resultados anteriores, revelando valores más altos en los tratamientos que habían recibido aplicaciones de LD respecto a los tratamientos sin (control y fertilización mineral) para Ni, Cd, Pb, Zn y Cu. Las concentraciones de Cr extraído mediante DTPA, no fueron posibles de cuantificar debido a la baja concentración de este elemento, que impidió ser detectado al estar por debajo del límite cuantificable del equipo empleado.

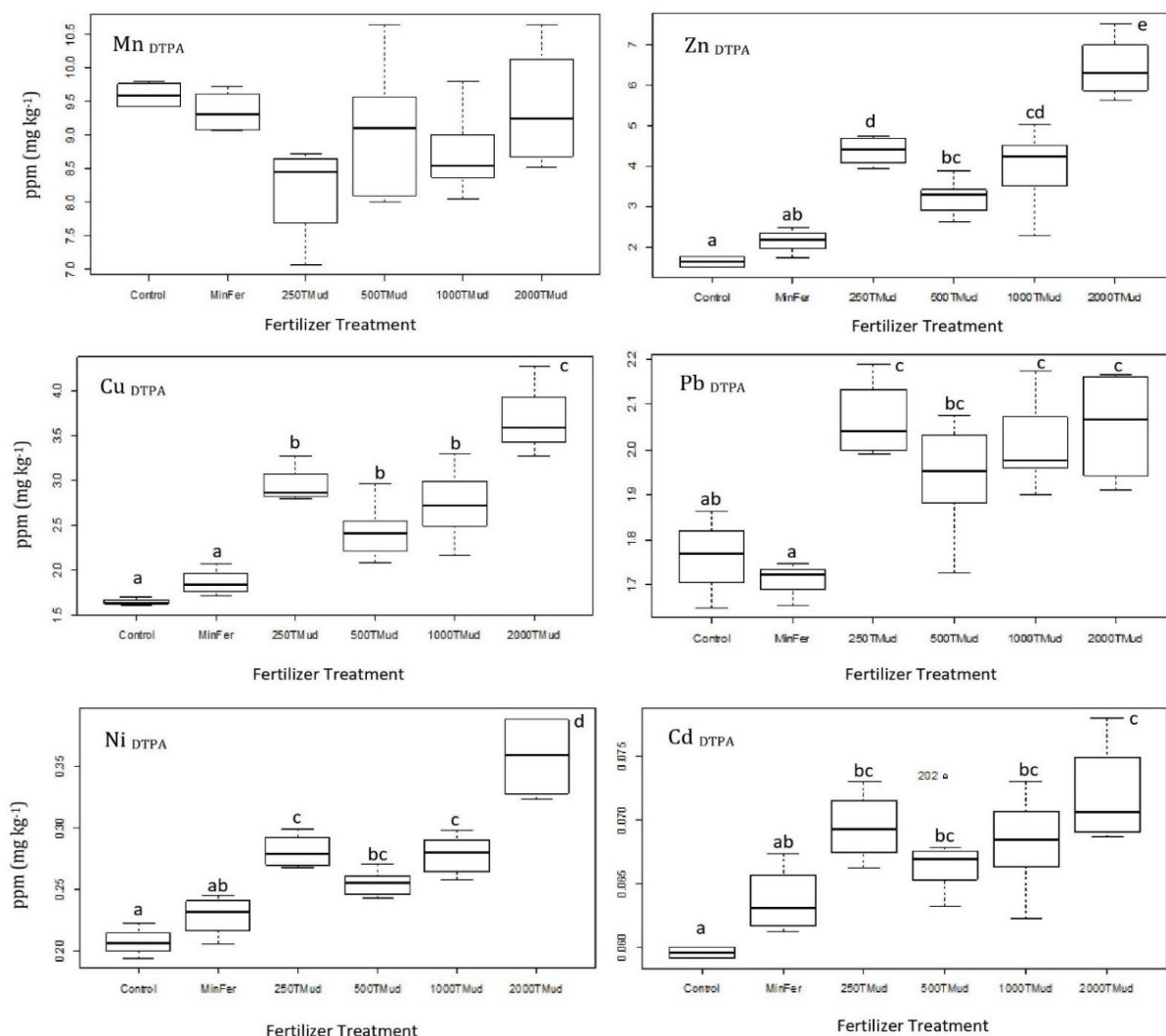


Figura 18. Gráfica de caja y bigotes de la concentración extraíble mediante DTPA de Mn, Zn, Cu, Pb, Ni y Cd, existentes en profundidad 0-30 cm en función del tratamiento fertilizante recibido. Parte superior e inferior de la caja = percentiles 75 y 25, respectivamente. Parte superior e inferior de los bigotes = percentiles 90 y 10, respectivamente. Línea en el interior de la caja = mediana (percentil 50). Puntos más allá de los bigotes = valores atípicos. Letras diferentes indican diferentes grupos homogéneos según el test de Tukey. Los metales pesados están representados de mayor a menos concentración presente en el lodo de depuradora.



Por último, en cuanto a metales pesados, la cuantificación de estos en el cultivo sí diferenció en dos partes; grano y paja. En grano, no se identificaron diferencias significativas en la concentración de MP en grano en función de los distintos tratamientos fertilizantes a excepción del Zn (Tabla 6). El Zn mostró una diferencia significativa encontrándose la mayor concentración en el tratamiento fertilizante de 2000 Mg ha⁻¹. Este MP fue el que se encontró en mayor concentración en el grano.

El resultado del contraste entre tratamientos con y sin LD, confirmó la diferencia significativa en Zn y reveló diferencias en Cr y Cu. En estos MP las concentraciones de los tratamientos que habían recibido LD eran mayores a los que no habían recibido (control y fertilización mineral).

Tabla 6: Concentración media de metales traza en el grano junto a sus desviaciones estándar en función del tratamiento fertilizante recibido. Letras diferentes indican diferentes grupos homogéneos según el test de Tukey.

Tratamiento fertilizante	ppm Grano							
	Cr	Cu	Mn	Ni	Zn	Cd	Pb	Hg
250 Mg ha ⁻¹	1,35±0,2	5,94±0,4	17,27±0,6	0,83±0,1	34,3 ^{ab} ± 2,4	0,01±0,0	0,10±0,0	0,01±0,0
500 Mg ha ⁻¹	1,23±0,2	5,69±0,3	16,80±1,6	0,81±0,1	31,0 ^a ± 2,6	0,01±0,0	0,10±0,0	0,01±0,0
1000 Mg ha ⁻¹	1,31±0,3	5,67±0,3	17,10±1,8	0,83±0,1	35,2 ^{ab} ± 3,2	0,01±0,0	0,10±0,0	0,01±0,0
2000 Mg ha ⁻¹	1,41±0,1	5,63±0,4	17,80±1,2	0,90±0,0	37,1 ^b ± 4,1	0,01±0,0	0,11±0,0	0,00±0,0
Fertilización mineral	1,03±0,1	5,66±0,2	18,44±1,1	0,73±0,1	30,4 ^{ab} ± 2,6	0,01±0,0	0,10±0,0	0,01±0,0
Control	1,26±0,5	5,27±0,2	17,29±1,8	0,78±0,3	32,1 ^{ab} ± 2,6	0,01±0,0	0,12±0,0	0,00±0,0

En paja no se encontraron diferencias significativas en la concentración de MP analizados en la paja en función del tratamiento, a excepción del Mn (Tabla 7). Los resultados mostraron mayor concentración de Mn en la paja en los tratamientos sin LD aplicado (control y fertilización mineral), en comparación con los tratamientos que sí habían recibido. Este MP, además, fue el que se encontró en mayor concentración en la paja.

Tabla 7: Concentración media de metales traza en el grano junto a sus desviaciones estándar en función del tratamiento fertilizante recibido. Letras diferentes indican diferentes grupos homogéneos según el test de Tukey.

Tratamiento fertilizante	ppm Paja							
	Cr	Cu	Mn	Ni	Zn	Cd	Pb	Hg
250 Mg ha ⁻¹	1,71±0,4	2,88±0,3	16,82 ^{ab} ± 2,4	0,95±0,3	8,16±1,0	0,04±0,0	0,24±0,0	0,01±0,0
500 Mg ha ⁻¹	1,58±0,2	2,50±0,4	17,38 ^a ± 2,2	1,01±0,2	7,31±1,0	0,03±0,0	0,25±0,1	0,01±0,0
1000 Mg ha ⁻¹	1,84±0,7	2,67±0,6	15,64 ^a ± 4,6	1,02±0,3	6,98±1,7	0,03±0,0	0,22±0,1	0,01±0,0
2000 Mg ha ⁻¹	1,54±0,8	2,78±0,5	17,73 ^{ac} ± 3,1	0,96±0,5	7,00±0,4	0,03±0,0	0,27±0,1	0,01±0,0
Fertilización mineral	2,26±1,0	2,82±0,6	24,37 ^{bc} ± 3,4	1,51±0,6	6,91±1,8	0,04±0,0	0,31±0,1	0,01±0,0
Control	2,55±0,4	2,25±0,4	25,12 ^c ± 5,3	1,34±0,4	9,26±1,6	0,03±0,0	0,23±0,0	0,01±0,0

El resultado del análisis complementario, confirmó la diferencia significativa del Mn y reveló diferencias en Cr y Ni. En los tres MP las concentraciones de los tratamientos que no habían recibido LD (control y fertilización mineral) eran mayores a los que habían recibido LD. Estos resultados, que a priori pueden parecer contradictorios, se debe probablemente al rendimiento los tratamientos, provocando un “efecto de dilución”. El LD produce un aumento de los rendimientos que, unido a bajas concentraciones aplicadas de MP s través del lodo, provoca una dilución de estos en los tratamientos con aplicaciones.

Gracias a estos resultados (los referentes a metales pesados y a las características físico-químicas del suelo) fue posible la publicación de dos artículos científicos en revistas de carácter internacional y acceso abierto:

Por un lado, en la revista Minerals (MDPI) se publicó el artículo denominado “*Effect of the Long-Term Application of Sewage Sludge to A Calcareous Soil on Its Total and Bioavailable Content in Trace Elements, and Their Transfer to the Crop*”. Por otro lado, en la revista Land (MDPI), se publicó el artículo “*Soil Quality Assessment after 25 Years of Sewage Sludge vs. Mineral Fertilization in a Calcareous Soil*”.

IX. Determinación del P disponible (Olsen) y saturación de P (Obj A.20):

El análisis de fósforo (P) disponible se realizó durante todos los años del proyecto por ser un nutriente esencial y por su especial problemática tanto en relación a las enmiendas consideradas (lodos EDAR) como en relación a la nutrición vegetal en suelos calcáreos. A continuación, se muestran los resultados obtenidos este año (campaña 20/21) en la siguiente figura a una profundidad de 0-30 cm:

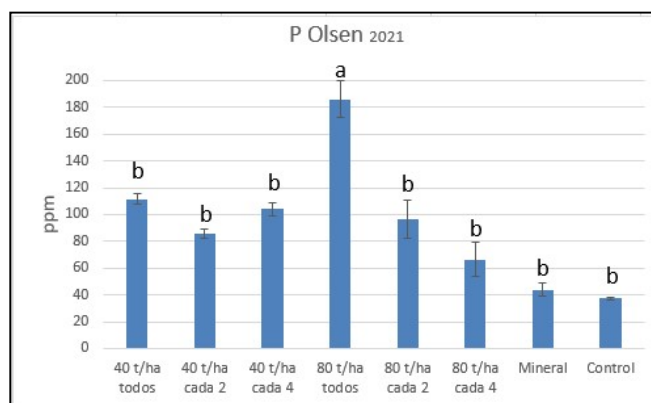


Figura 19. Valores de P Olsen en la profundidad de labranza (0-30 cm), en función tratamiento en la parcela INTIA-UPNA-Metales pesados. Medias y errores estándar (n = 3); p < 0.05; letras para grupos homogéneos según Duncan

Se observa una relación directa entre la proporción de lodos aplicados y el contenido de P Olsen en la profundidad de estudio (Figura 19 y 20). Esto es esperable considerando la tipología de materiales presentes en el suelo. Estos resultados fueron vistos (Figura 20) en la campaña 19 (año 2018/2019) y 20 (2019/2020) en donde este mismo análisis se realizó diferenciando dos profundidades (0-15 cm y 15-30 cm), y se corrobora la relación directa entre la proporción de lodos aplicados y el contenido en P Olsen en ambas profundidades.

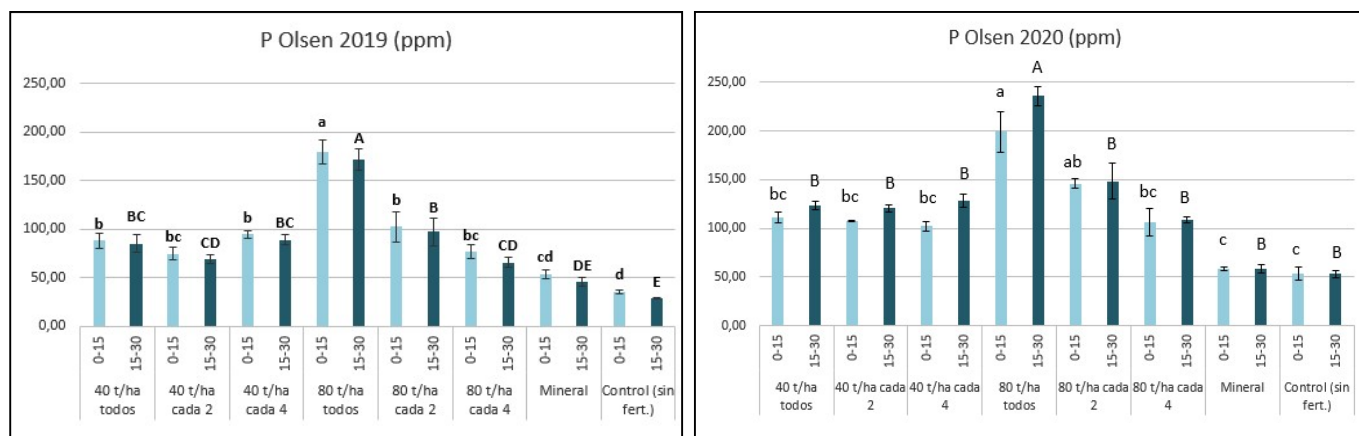


Figura 20. Valores de P Olsen 2019 y 2020 en las profundidades de estudio (0-15 cm y 15-30 cm; izquierda) en la parcela INTIA-UPNA-Metales pesados. Medias y errores estándar (n = 4); p < 0.05; letras para grupos homogéneos según Duncan).

Si comparamos los valores de P Olsen de este año con los pasados del proyecto (Figura 21), podemos comprobar que el nivel ha disminuido en todos los tratamientos en referencia al año pasado. Esto podría deberse a la variabilidad entre campañas incrementado por el hecho de que el muestreo y posterior análisis se realizó tras un cultivo de girasol, el cual es muy demandante en cuanto a fósforo. Además, para esa campaña (girasol) solo había recibido lodos el tratamiento 1 y 4 (correspondientes a todos los años).

Se realizó una revisión metodológica que sirvió de intercalibración entre laboratorios, y confirmó los valores observados, que, por otro lado, mostraron una distribución similar a la observada desde 2002 (Figura 21), con la excepción del tratamiento con máxima dosis, que ha mostrado desde 2019 un aumento considerable y que ha permanecido con valores elevados en estos años de proyecto.

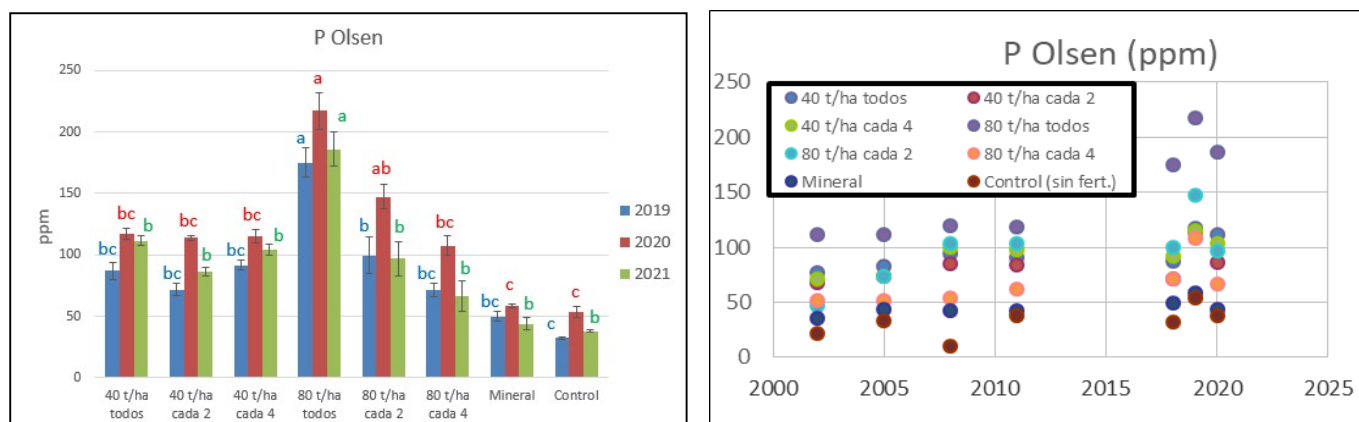


Figura 21. Valores de los P Olsen (0-30 cm) en los años de proyecto (izq) y desde 2002 (dcha.) en la parcela INTIA-UPNA-Metales pesados. Medias y errores estándar ($n = 3$); $p < 0.05$; letras para grupos homogéneos según Duncan).

Por último, se analizó el contenido total de fósforo en el suelo y se comparó con su contenido disponible para las plantas (Olsen) para el mismo año (campaña 2018/2019).

Como puede observarse en la Figura 22, el fósforo disponible representa un escaso porcentaje respecto el total del suelo. Tal y como ocurre con los metales traza estudiados, el fósforo, una vez incorporado al suelo a través de lodos de depuradora, presenta formas poco biodisponibles para la planta debido a la afinidad del macronutriente con la fracción sólida del LD durante el proceso de tratamiento de aguas residuales (Alvarenga et al., 2015). No obstante, la concentración biodisponible y total aumenta en general con el aporte de lodos y en particular con el tratamiento de mayor dosis anual (Kidd et al., 2007) (Urra et al., 2019).

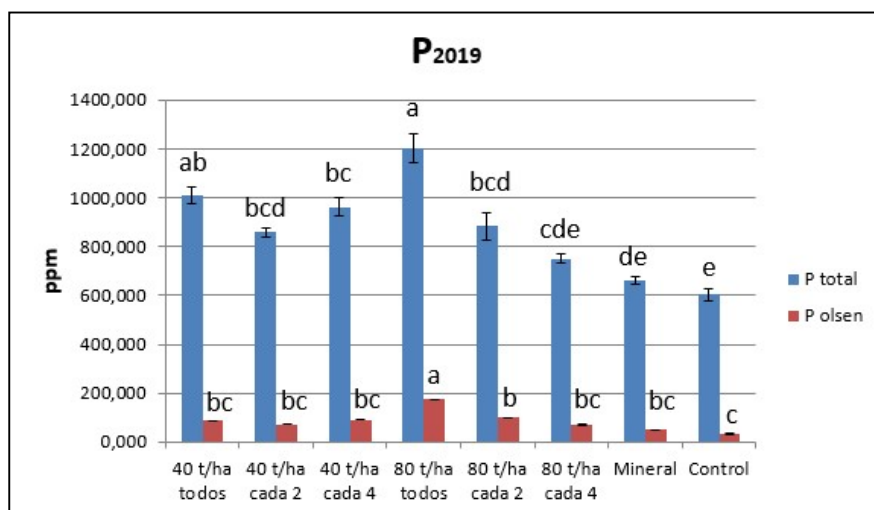


Figura 22. Comparación valores de los P total y Olsen analizado en suelo (0-30 cm), en función del tratamiento en la parcela INTIA-UPNA-Metales pesados. Medias y errores estándar ($n = 3$); $p < 0.05$; letras para grupos homogéneos según Duncan).



B. PARCELA INTIA-UPNA ECO COBERTERA

I. Caracterización físico química del suelo (Obj A.G.1):

El suelo sobre el que está situado el ensayo es Cambisol Calcárico (FAO-UNESCO, 1997) sin problemas de profundidad efectiva y textura franco-limosa, con uso agrícola de regadío por inundación durante décadas y homogéneo en todos los parámetros estudiados, lo que facilitará la detección de posibles diferencias futuras debidas a los fertilizantes.

En conductividad eléctrica (CE), se observó homogeneidad entre tratamientos, pero no entre profundidades, teniendo valores superiores de sales solubles la capa más superficial y disminuyen en profundidad (Figura 23). Este perfil invertido en cuanto a salinidad, es habitual encontrarlos en suelos con un nivel freático próximo a la superficie. Se podría garantizar que si en un futuro existen diferencias significativas será debido a los tratamientos. No obstante, los valores presentes no suponen problemas para el desarrollo radicular y no hay problemas de salinidad. Los valores de pH fueron homogéneos entre tratamientos y en profundidad (Figura 23) estando por encima del 8,5 siendo un suelo básico.

En densidad aparente nos encontramos entre valores de 1,5 y 1,6 g cm⁻³; algo superior a lo que cabría esperar por su textura franca. Aun así, el suelo contempla unos valores apropiados para la agricultura y se puede confirmar que no presenta compactación. En cuanto al porcentaje de poros, al ser un valor íntimamente relacionado con la densidad aparente, presenta un comportamiento similar a esta, presentando en general una buena porosidad, lo que supone un buen drenaje, aireación y un ambiente óptimo para el crecimiento de las raíces.

El contenido en materia orgánica es bajo (1,5%) siendo inferior al 2%, aunque similar a las zonas productivas de la zona.

En cuanto a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se observa un valor bajo, esperable debido al contenido de materia orgánica presente. Los valores de P se presentan también bajos.

En general estamos ante un suelo con propiedades físicas adecuadas para el buen desarrollo de los cultivos, pero con baja fertilidad química, la cual se espera aumentar con los fertilizantes orgánicos que se incorporen con el tiempo.

Tabla 8. Características físico - químicas del suelo ensayado en Sartaguda (0–30 cm). Los valores se indican como media $\pm$ desviación estándar (n = 4).

Características Físico Químicas	
pH	8,72 $\pm$ 0,04
Conductividad eléctrica (μ s cm ⁻³)	181,9 $\pm$ 14,3
Densidad aparente (g cm ⁻³)	1,64 $\pm$ 0,05
Poros (%)	38,03 $\pm$ 1,82
Carbonatos (%)	18,12 $\pm$ 0,26
Arcillas (%)	12,8 $\pm$ 0,87
Carbono Orgánico (%)	0,92 $\pm$ 1,57
CIC (mEq-g/kg s)	13,69 $\pm$ 2,95
Na ⁺ (mEq-g/kg s)	2,98 $\pm$ 0,13
K ⁺ (mEq-g/kg s)	2,47 $\pm$ 0,08
Mg ²⁺ (mEq-g/kg s)	7,54 $\pm$ 0,25
Ca ²⁺ (mEq-g/kg s)	123,9 $\pm$ 11,3
N total (%)	0,10 $\pm$ 0,01
P disponible (ppm)	24,47 $\pm$ 1,99

A continuación, se muestran las figuras de la caracterización de los parámetros señalados en la Tabla 8, diferenciado por tratamientos. Se analizarán los parámetros relacionados con las características físicas del suelo (densidad aparente, porosidad total, textura, etc.), así como características químicas (CIC, cationes, nitrógeno, fósforo, etc.). Los parámetros incluidos específicamente en los objetivos (capacidad de retención de agua, estabilidad de la estructura, conductividad hidráulica y compactación) se analizarán por separado.

La caracterización físico química se hizo antes de la aplicación de los tratamientos los cuales, en las siguientes figuras, son teóricos y representan las aplicaciones que recibieron posteriormente. Por lo tanto, cualquier cambio producido a lo largo de la rotación, podrá asociarse con el tratamiento recibido.

Tanto el pH como la conductividad eléctrica no mostraron diferencias significativas, por lo tanto, estamos ante una parcela homogénea en cuanto a sales solubles y pH.

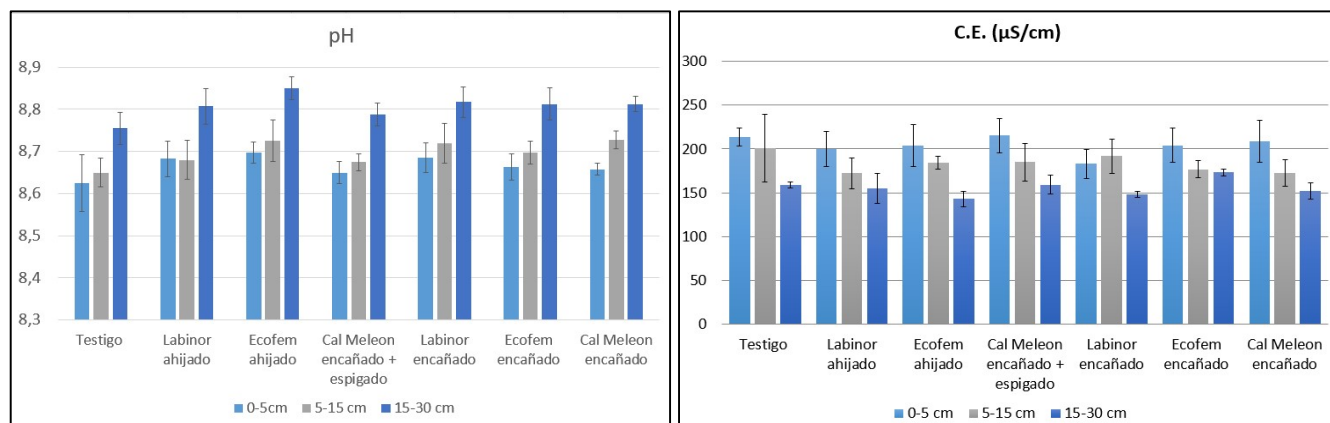


Figura 23: Valores de pH (izda.) y conductividad eléctrica (dcha.) diferenciados por profundidades de estudio (0-5 cm; 5-15 cm; 15-30 cm) en función del tratamiento en la parcela INTIA-UPNA-Eco cobertera. Medias y errores estándar (n = 4); $p < 0.05$; letras para grupos homogéneos según Duncan.

En el estudio de la densidad aparente y porcentaje de poros se observó una diferencia significativa entre tratamientos en la segunda profundidad de estudio (5-15 cm). Las parcelas que van a recibir el tratamiento Labinor encañado tienen una densidad aparente menor respecto a las que recibirán Ecofem en ahijado. Este resultado se corroboró con los porcentajes de poros en donde Labinor encañado tuvo mayor porcentaje respecto a Ecofem en ahijado. Estas diferencias, sin embargo, no se observaron en el perfil completo de 0-30 cm en donde la parcela se muestra homogénea.

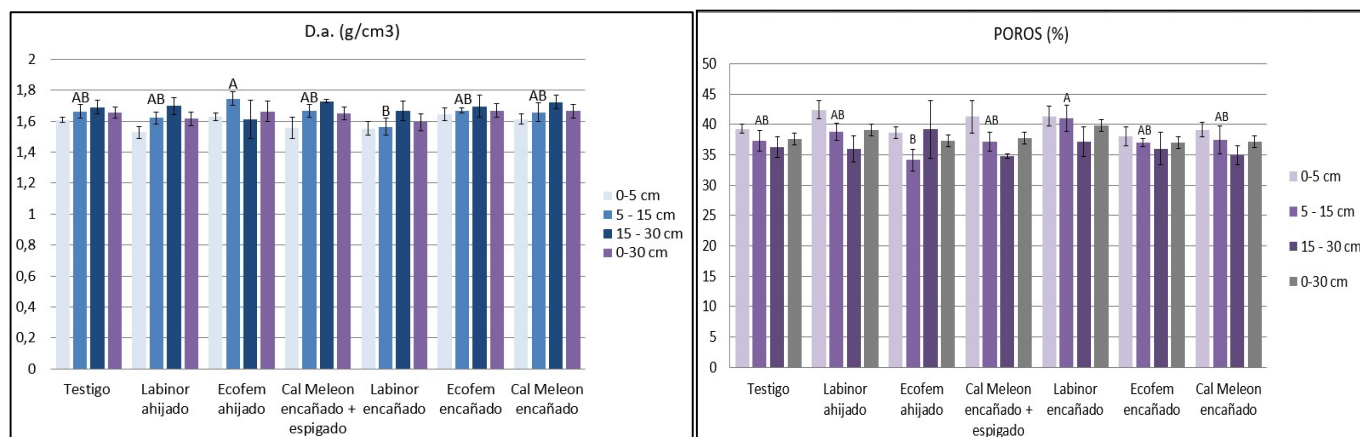


Figura 24: Valores de densidad aparente (izda.) y porcentaje de poros (dcha.) diferenciados por profundidades de estudio (0-5 cm; 5-15 cm; 15-30 cm; 0-30 cm) en función del tratamiento en la parcela INTIA-UPNA-Eco cobertera. Medias y errores estándar (n = 4); $p < 0.05$; letras para grupos homogéneos según Duncan.

En cuanto a la proporción de carbonatos, así como elementos finos (arenas, limos y arcillas) para determinar la clase textural, tampoco se aparecieron diferencias significativas entre las parcelas que recibirán los distintos tratamientos. En términos generales, en cuanto a parámetros físicos se refiere, nos encontramos en una parcela homogénea en la que las futuras posibles diferencias, podrían ser atribuidas a los tratamientos o la rotación que se va a realizar. El porcentaje de carbonatos, así como el de arcillas, tendrán un papel importante en la formación de complejos órgano – minerales tras la aplicación de fertilizantes orgánicos.

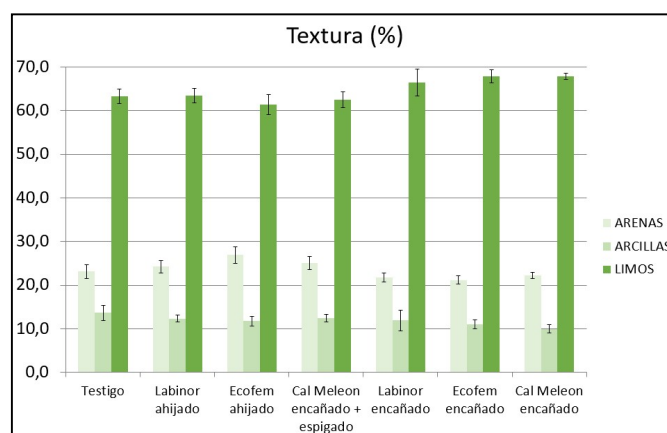
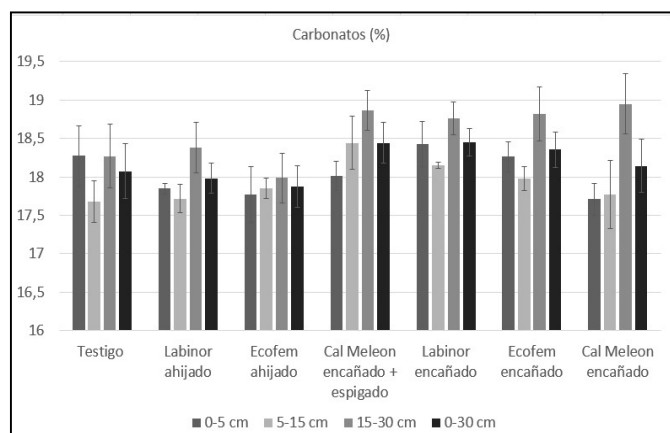


Figura 25: Valores de carbonatos (izda.) en las diferentes profundidades de estudio y porcentaje de elementos finos en la profundidad más superficial (0-5 cm) (dcha.) en función del tratamiento en la parcela INTIA-UPNA-Eco cobertera. Medias y errores estándar (n = 4); p < 0.05; letras para grupos homogéneos según Duncan.

En cuanto a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) no se observaron diferencias significativas entre tratamientos. Los valores estuvieron entre 14,58 y 12,73 mEq-g/kg suelo, siendo las parcelas que albergan el tratamiento Testigo y Cal Meleon en encañado las que presentan estos valores respectivamente. Con el futuro aporte de fertilizantes, será también interesante ver si el Testigo reduce su valor en comparación con el resto de tratamientos.

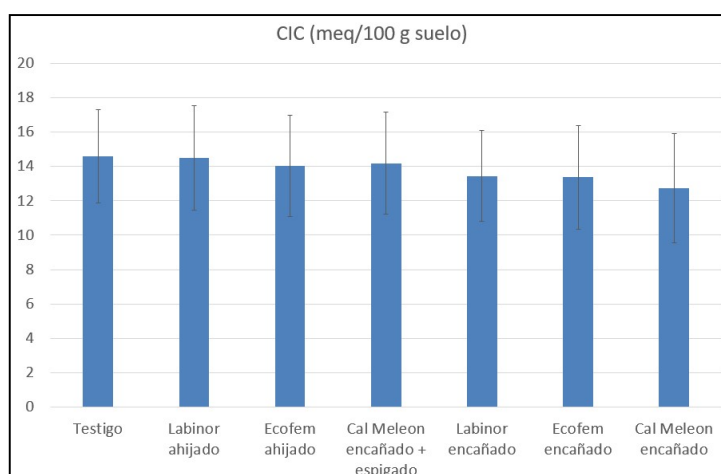


Figura 26: Valores de Capacidad de Intercambio Catiónico en la profundidad de labranza (0-30 cm) en función del tratamiento en la parcela INTIA-UPNA-Eco cobertera. Medias y errores estándar (n = 4); p < 0.05; letras para grupos homogéneos según Duncan.

Para completar el estudio de fertilidad química, se analizó el contenido de cationes en el complejo de cambio: Na⁺, K⁺, Mg²⁺ y Ca²⁺.

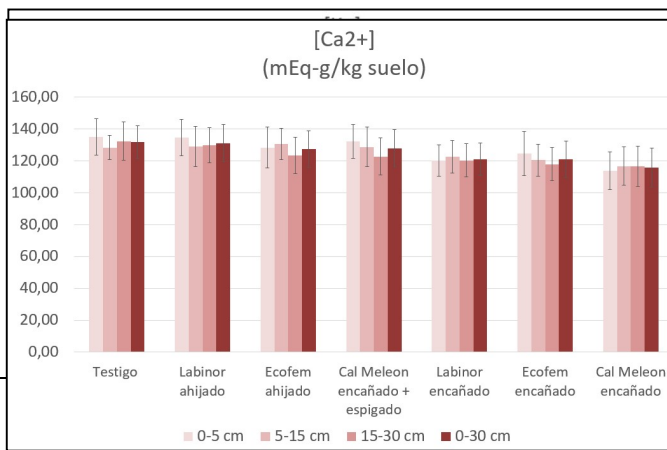
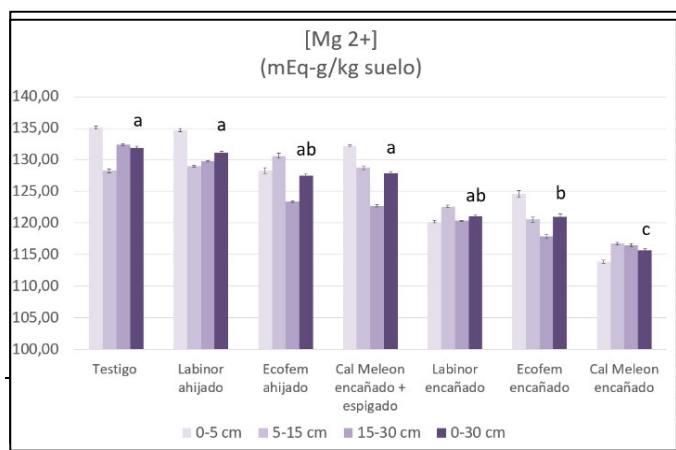


Figura 27. Contenido de Na^+ , K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} en el complejo de cambio en las profundidades de estudio (0-5, 5-15, 15-30 y 0-30 cm) en función del tratamiento en la parcela INTIA-UPNA-Eco cobertera. Medias y errores estándar ($n = 4$); $p < 0.05$; letras para grupos homogéneos según Duncan.

En Na^+ y Ca^{2+} no se observaron diferencias significativas entre los distintos tratamientos (Figura 27). Sin embargo, en K^+ y Mg^{2+} sí se encontraron diferencias significativas (Figura 27), por lo que la situación de inicio no es homogénea para estos cationes. En K^+ , fueron las parcelas testigo las que mostraron una menor concentración del catión. Esta diferencia se ve a lo largo de las tres profundidades estudiadas; 0-5 cm, 5-15 cm y 15-30 cm (datos no mostrados). En el caso del Mg fueron las parcelas que albergaran el tratamiento de Cal Meleon aplicado en encañado las que presentaron valores más bajos en todas las profundidades estudiadas (datos no mostrados).

En cuanto a macronutrientes se determinó el valor de fósforo (Olsen) y nitrógeno (total). En ambos elementos no se encontraron diferencias significativas entre las distintas parcelas en función del tratamiento a lo largo del perfil de labranza (0-30), por lo que las posibles futuras diferencias estarán relacionadas con estos o con la rotación.

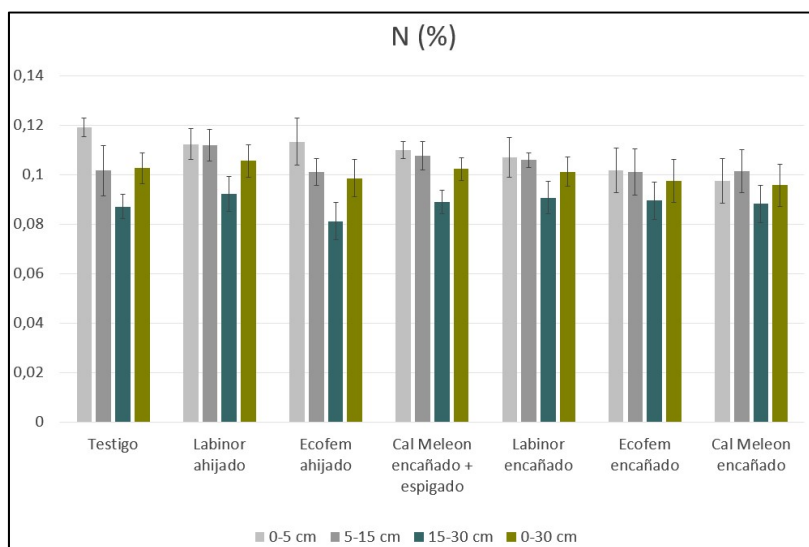


Figura 28. Proporción de N total sobre materia seca en la profundidad de labranza (0-30 cm) en función del tratamiento en la parcela INTIA-UPNA-Eco cobertera. Medias y errores estándar ($n = 4$); $p < 0.05$; letras para grupos homogéneos según Duncan.

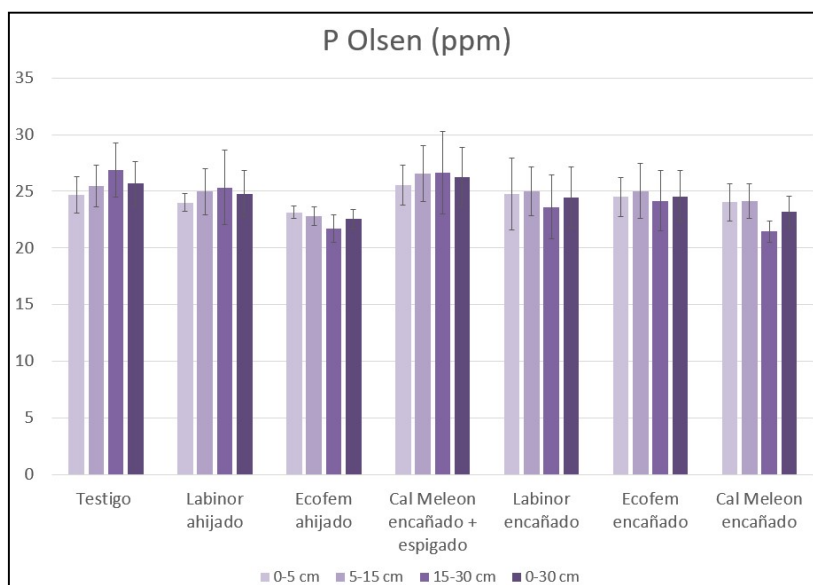


Figura 29. Valores de P Olsen en la profundidad de labranza (0-30 cm) en función del tratamiento en la parcela INTIA-UPNA-Eco cobertera. Medias y errores estándar (n = 4); p < 0.05; letras para grupos homogéneos según Duncan.

II. Determinación de la retención de agua (Obj A.8):

La siguiente figura muestra el contenido de agua almacenada en el horizonte labrado en los dos puntos característicos estudiados (capacidad de campo, considerada equivalente a la retención a -33 KPa), y punto de marchitez permanente (correspondiente a -1500 KPa). El agua retenida entre estos dos puntos se considera equivalente a la capacidad de retención de agua disponible para las plantas (CRAD), y se estudió en volumen (L/m²).

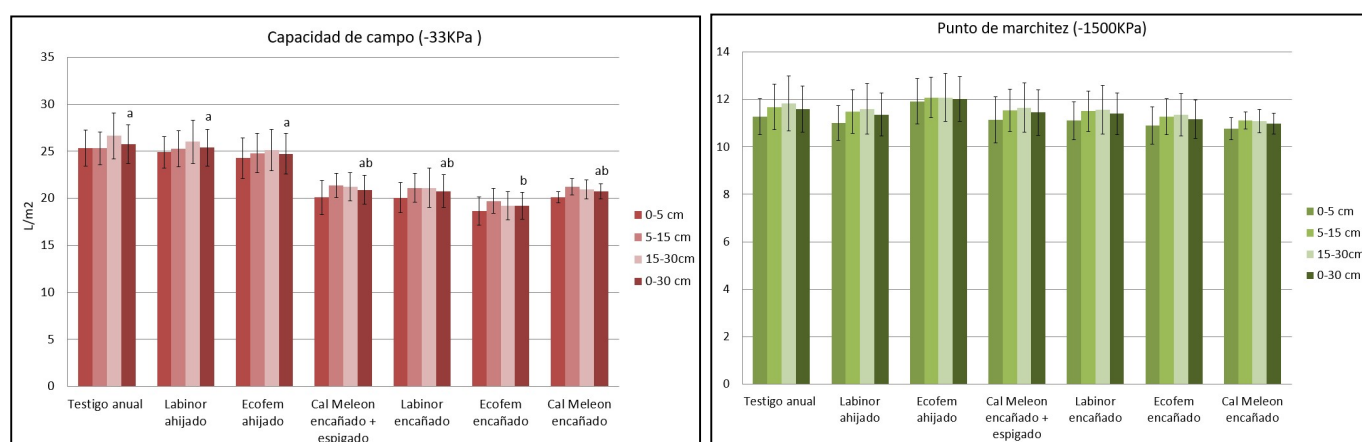


Figura 30. Valores de retención de agua en volumen (L/m²) en la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente en la parcela INTIA-UPNA-Eco Cobertera, en las profundidades de estudio (0-5, 5-15, 15-30 y 0-30 cm) en función de cada tratamiento. Medias y errores estándar (n = 4); p < 0.05; letras para grupos homogéneos según Duncan.

A capacidad de campo el tratamiento "Ecofem encañado" muestra una retención significativamente menor, mostrándose en todas las profundidades de estudio (datos no mostrados). Estas diferencias no pueden explicarse por efecto del tratamiento, por lo que, de mantenerse en el tiempo, deberán ser consideradas en la interpretación de los resultados de producción y otros parámetros relacionados con la disponibilidad de agua. En punto de marchitez no se observan diferencias entre tratamientos, lo que argumenta la homogeneidad textural en la parcela al estar este parámetro de retención de agua asociado a la textura. Probablemente, a raíz de estas diferencias en CC, se observaron diferencias significativas en CRAD en la profundidad de labranza (0-30 cm). Esta diferencia apareció en la profundidad 15-30 cm (datos no mostrados).

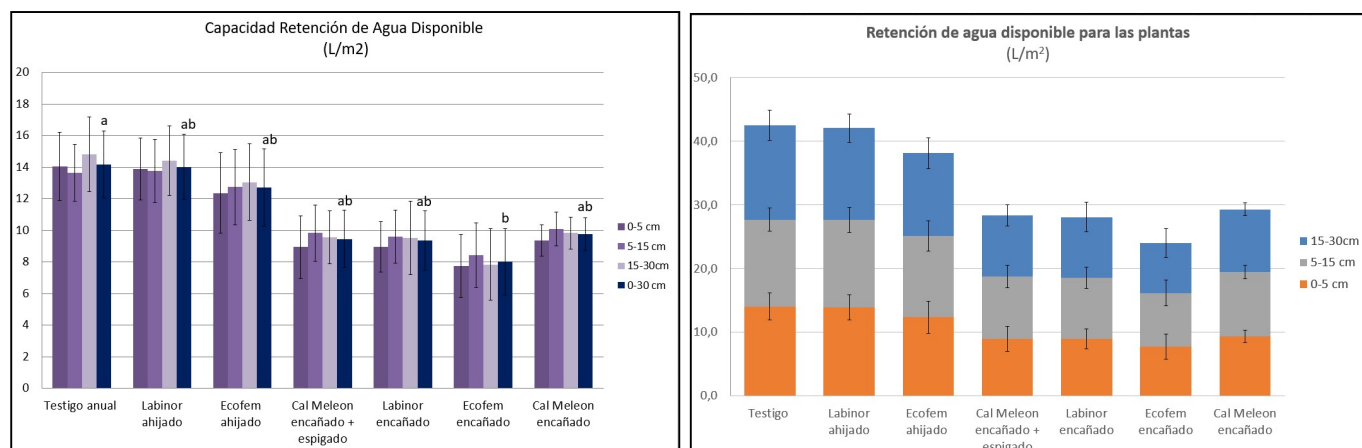


Figura 31. Valores de retención de agua disponible para las plantas en volumen (L/m²) en la parcela INTIA-UPNA-Eco cobertera en las profundidades de estudio (0-5, 5-15, 15-30 y 0-30 cm) en función del tratamiento. Medias y errores estándar (n = 4); p < 0.05; letras para grupos homogéneos según Duncan.

III. Determinación de la compactación (Obj A.10):

Según se observa en la figura, todas las parcelas presentan la forma característica del perfil de compactación correspondiente a una suela de labor. Esto se corresponde con el tipo de manejo del suelo con laboreo convencional, y se manifiesta en un aumento de la resistencia a la penetración entre los 10 y 30 cm de profundidad. A partir de esta profundidad, las diferencias entre tratamientos desaparecen, o se hacen menos evidentes (hasta los 60 cm de profundidad medidos).

La parcela recibe labores propias de la agricultura convencional, sin embargo, debido a los próximos aportes de abono orgánico, el suelo podría sufrir paulatinas modificaciones físico químicas que se aprecien en próximos años, entre ellas, una posible disminución de la compactación.

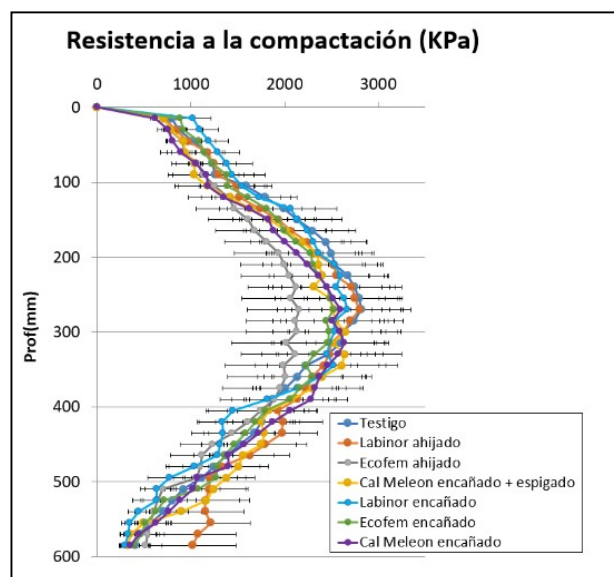


Figura 32. (Drch.) Resistencia a la compactación en la parcela INTIA-UPNA-Eco cobertera en función de los tratamientos. Medias y errores estándar (n = 4).

IV. Conductividad hidráulica saturada (Obj A.15):

Como se vio en el apartado de la parcela de Arazuri, INTIA-UPNA-Metales pesados, el método / equipo utilizado no fue apropiado para el tipo de muestras del proyecto.

Tal y como ocurrió en las muestras de Arazuri, las muestras de Sartaguda tampoco aportaron datos válidos en cuanto a la conductividad hidráulica.

V. Estabilidad de agregados (Obj A.16):

La estabilidad de los agregados se mostró homogénea en toda la parcela independiente del tratamiento que fuera a recibir. Esto confirma la homogeneidad en general de otras características físico químicas como el porcentaje de poros, la textura, conductividad eléctrica, capacidad de retención de agua, etc., respaldando así nuestros resultados. Como consecuencia de estos resultados, se puede decir que la adición de fertilizantes orgánicos será la causa principal de posibles futuros cambios en esta estabilidad.

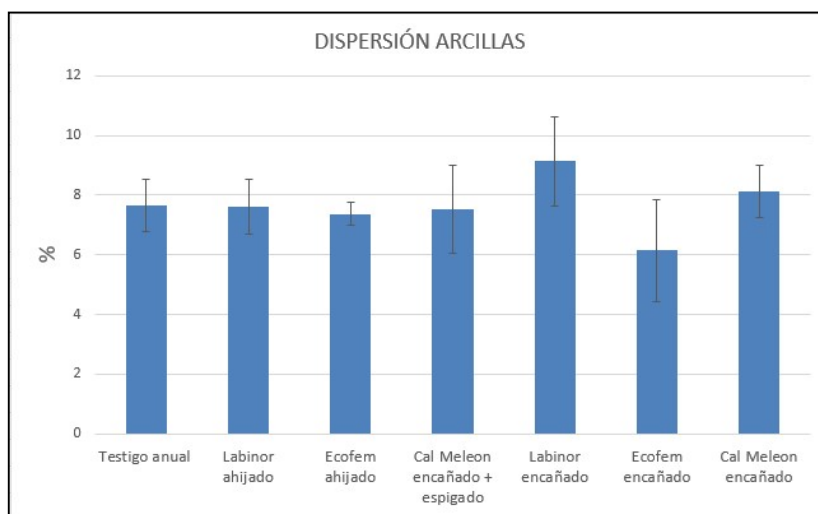


Figura 33. Valores de estabilidad de la estructura en la profundidad más superficial (0-5 cm) en función del tratamiento en la parcela INTIA-UPNA-Eco cobertera. Proporción de dispersión de las arcillas (0-5 cm). Medias y errores estándar (n = 4).

VI. Fraccionamiento de la materia orgánica (Obj. A17)

Se analizó el contenido en carbono orgánico total y carbono lábil (porción no ligada a la fracción mineral e indicador precoz de cambios producidos en el suelo tras la adición de materia orgánica).

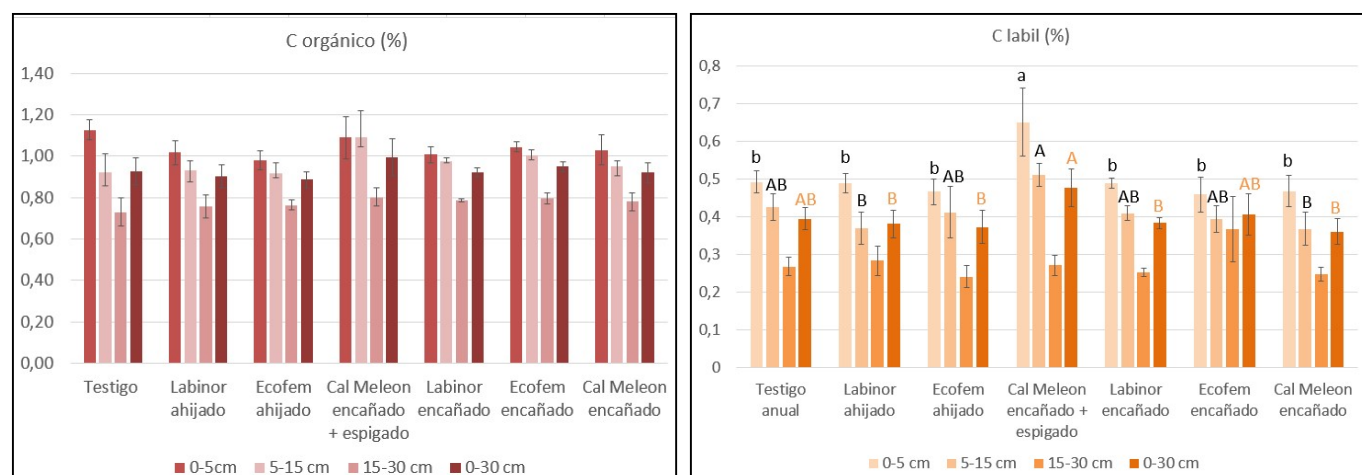


Figura 34: Valores de Carbono orgánico (izda.) y Carbono lábil (dcha.) en las diferentes profundidades de estudio (0-5 cm; 5-15 cm; 15-30 cm y 0-30 cm) en función del tratamiento en la parcela INTIA-UPNA-Eco cobertera. Medias y errores estándar (n = 4); p < 0.05; letras para grupos homogéneos según Duncan.

El contenido de carbono orgánico no mostró diferencias significativas, siendo homogéneo en toda la parcela. Sin embargo, el carbono lábil mostró algunas diferencias significativas en los distintos horizontes de muestreo, que se vieron reflejados en la profundidad de labranza (0-30 cm). Las parcelas que albergan Cal Meleon en encañado y espigado, aparentemente presentan un mayor contenido de carbono lábil en los horizontes 0-5 y 5-15. Este resultado podría ser debatido ya que las parcelas están distribuidas al azar y como se ha mencionado, los tratamientos en este año de análisis aún eran teóricos. Encontrar diferencias en un parámetro de estas características en una situación de "inicio", es cuestionable y se podría pensar en posibles errores metodológicos a la hora de analizar este parámetro. Sin embargo, este parámetro (C lábil), será interesante ver como evoluciona en general y concretamente en este tratamiento, ya que este fertilizante es foliar y como se ha mencionado anteriormente, el C lábil es un buen indicador precoz.



VII. Determinación de la producción de grano (Obj A.1):

Esta campaña (2020-21) correspondía al cultivo de leguminosa dentro de la rotación ensayada. Se sembró una mezcla de veza-avena y se segó en verde. Por lo tanto, no se han obtenido datos de rendimiento (ni de otros parámetros) para esta campaña, siendo la campaña que viene interesante en la rotación ya que albergará de nuevo trigo.

Se presentan los resultados correspondientes a los rendimientos obtenidos a lo largo del proyecto en tres campañas; campaña 2018/2019 (2019), campaña 2019/2020 (2020) y campaña 2020/2021 (2021).

Tabla 9. Comparación de medias de rendimiento de los diferentes tratamientos según el test de Duncan en los años de duración del proyecto (n = 4; letras iguales indican que no hay diferencias significativas, p<0,05)

Tratamiento	Kg/ha 2021	Kg/ha 2020	Kg/ha 2019
Testigo	-	5443,9 a	3774 a
Labinor ahijado	-	5618,9 a	-
Ecofem ahijado	-	5372,7 a	-
Cal Meleon encañado + espigado	-	5495,9 a	-
Labinor encañado	-	5583,9 a	4054 a
Ecofem encañado	-	5266,2 a	3515 a
Cal Meleon encañado	-	5496,9 a	3564 a

El análisis de varianza no mostró diferencias significativas en rendimiento en función de los distintos tratamientos. Se aprecia un aumento de rendimiento en la campaña 2020 respecto a la del año anterior. Conviene recordar que el ensayo se replanteó para poder estudiar un mayor número de aplicaciones en función del estado fenológico del cultivo, y para ello se cambió el ensayo de ubicación, pudiendo ser esta la razón del aumento en rendimiento, unido al cambio de variedad que también se dio.

VIII. Determinación del índice de Cosecha y de Nitrógeno (Obj A.3):

Tal y como ocurre con el rendimiento, los datos de índice de cosecha (IC) e índice de nitrógeno (IN) no se aportan en esta campaña al haber albergado un cultivo alternativo.

El IC se expresa como el cociente entre el peso seco del grano y el peso seco de toda la biomasa aérea (incluyendo grano). A continuación, se muestran los datos obtenidos en las campañas anteriores.

Tabla 10. Comparación de medias de Índice de cosecha (IC) de los diferentes tratamientos según el test de Duncan en los años de duración del proyecto (n = 4; letras iguales indican que no hay diferencias significativas, p<0,05).

Tratamiento	IC 2021	IC 2020	IC 2019
Testigo	-	0,4 ab	0,3 a
Labinor ahijado	-	0,5 ab	-
Ecofem ahijado	-	0,5 ab	-
Cal Meleon encañado + espigado	-	0,5 a	-
Labinor encañado	-	0,4 b	0,3 a
Ecofem encañado	-	0,5 ab	0,3 a
Cal Meleon encañado	-	0,4 ab	0,3 a

Como se observa en la Tabla 10, de 2019 a 2020 se intuye un aumento de IC en todos los tratamientos que coinciden en ambas campañas. A pesar que IC es un valor estable, este ligero aumento podría ser debido al cambio de variedad de trigo existente entre ambos años.



Por otra parte, el IN se calcula como la relación del N total en grano y el N total en la biomasa aérea. Como pasa con IC, también se intuye un aumento del IN en los tratamientos aplicados en las dos campañas como consecuencia, probablemente, en el cambio de variedad. Sin embargo, para ambos índices, estas medias entre campañas no son comparables puesto que el cultivo estaba en distintas parcelas.

Tabla 11. Comparación de medias de Índice de nitrógeno (IN) de los diferentes tratamientos según el test de Duncan en los años de duración del proyecto (n = 4; letras iguales indican que no hay diferencias significativas, $p < 0,05$).

Tratamiento	IN 2021	IN 2020	IN 2019
Testigo	-	0,6 a	0,5 a
Labinor ahijado	-	0,6 a	-
Ecofem ahijado	-	0,6 a	-
Cal Meleon encañado + espigado	-	0,7 a	-
Labinor encañado	-	0,5 a	0,5 a
Ecofem encañado	-	0,6 a	0,4 a
Cal Meleon encañado	-	0,6 a	0,5 a

IX. Análisis de los parámetros básicos de calidad del grano (Obj A.4):

Al carecer de grano esta campaña, se presentan los parámetros básicos de calidad de grano (peso específico y peso de mil granos) estudiados en anteriores campañas no pudiendo comprarse entre ellas por pertenecer a parcelas distintas.

Tabla 12. Comparación de medias de peso específico y peso de mil granos de los diferentes tratamientos según el test de Duncan en los años de duración del proyecto (no incluye 2021) (n = 4; letras iguales indican que no hay diferencias significativas, $p < 0,05$).

Tratamiento	Peso específico (Kg/Hl)		Peso mil granos (g)	
	2020	2019	2020	2019
Testigo	76,2 a	80,7 a	41,8 a	41,4 a
Labinor ahijado	76,5 a	-	43,9 a	-
Ecofem ahijado	76,2 a	-	42,1 a	-
Cal Meleon encañado + espigado	76,3 a	-	43,4 a	-
Labinor encañado	76,6 a	80,4 a	42,9 a	41,4 a
Ecofem encañado	76,2 a	76,4 a	42,6 a	40,5 a
Cal Meleon encañado	76,3 a	77,1 a	43,0 a	42,2 a

No se encontraron diferencias significativas en ninguno de los parámetros en función del tratamiento.

X. Análisis de otros parámetros de calidad del grano (Obj A.5):

Se realizó un alveograma al grano de 2019 y 2020 para determinar los parámetros de calidad harino panadera. Estos parámetros fueron: Proteínas (%ss.), Tenacidad (P), Extensibilidad (L), Fuerza (W), Equilibrio (P/L) e Índice de elasticidad (Ie). Estas propiedades definen una buena calidad del grano para ser destinado a industria panadera, sector importante en la producción ecológica de cereales.

En la campaña 2018/2019 la variedad sembrada fue Ablaca;

Tabla 13. Comparación de medias de contenido de proteína, tenacidad, extensibilidad, fuerza, equilibrio e índice de elasticidad en grano Ablaca de los diferentes tratamientos según el test de Duncan en la campaña 2019 (n=4, letras iguales indican que no hay diferencias significativas, $p < 0,05$).



Tratamiento	Proteína (%ss.)	P (mm H ₂ O)	L (mm)	W (10E-04J)	P/L (mm H ₂ O/mm)	le (%)
TESTIGO	10,4 a	92,8 a	73,5 a	217,5 a	1,3 a	47,9 a
LABINOR N10	10,3 a	91,3 a	68,0 a	214,5 a	1,3 a	48,0 a
ECOFEM	10,9 a	93,0 a	71,3 a	217,8 a	1,3 a	48,8 a
CAL MELEON	11,1 a	90,0 a	77,8 a	220,5 a	1,2 a	48,9 a

No se encontraron diferencias significativas en ningún parámetro indicativo de calidad harino panadera en función del tratamiento aplicado.

En la campaña 2019/2020 la variedad sembrada fue Nudel;

Tabla 14. Comparación de medias de contenido de proteína, tenacidad, extensibilidad, fuerza, equilibrio e índice de elasticidad en grano Nudel de los diferentes tratamientos según el test de Duncan en la campaña 2020 (n=4, letras iguales indican que no hay diferencias significativas, p<0,05).

Tratamiento	Proteína (%ss.)	P (mm H ₂ O)	L (mm)	W (10E-04J)	P/L (mm H ₂ O/mm)	le (%)
Testigo anual	12,0 a	22,0 a	20,3 a	20,5 a	1,1 a	0,0 a
Labinor ahijado	12,0 a	22,5 a	22,3 a	21,5 a	1,0 a	0,0 a
Ecofem ahijado	11,8 a	23,3 a	22,3 a	22,5 a	1,0 a	0,0 a
Cal Meleon encañado + espigado	11,2 a	23,3 a	21,0 a	20,3 a	1,1 a	0,0 a
Labinor encañado	11,3 a	23,5 a	21,3 a	23,0 a	1,1 a	0,0 a
Ecofem encañado	11,0 a	25,0 a	26,0 a	27,0 a	1,0 a	0,0 a
Cal Meleon encañado	12,0 a	26,3 a	23,8 a	27,0 a	1,1 a	0,0 a

En esta campaña tampoco se encontraron diferencias significativas entre los distintos parámetros de calidad en función de los tratamientos aplicados.

A priori, la variedad Ablaca presenta una mejor calidad harino panadera en comparación a Nudel que no solo muestra valores bajos, sino una muy mala aptitud como trigo panadero. Esto puede ser útil de cara a futuras campañas para evaluar como de positivo puede ser un precedente de leguminosa o los distintos tratamientos en el aumento de calidad.

XI. Determinación del nitrógeno mineral del suelo (Nmin) (Obj A.6):

Se entiende por Nmin a la suma de nitratos y amonio presentes en el suelo en un momento determinado y por tanto al N disponible para el cultivo (en ese momento). Se ha calculado el Nmin a lo largo de las 3 campañas de estudio en distintos momentos clave: presembrado, precosecha y postcosecha. La profundidad de muestreo fueron los 60 primeros centímetros de suelo. Este parámetro es el primero a calcular para posteriormente poder realizar el balance de N.

El Nmin calculado en la campaña 2019, correspondiente al primer año del proyecto, y por tanto ubicado en una parcela distinta a la de años posteriores y con variedad de trigo Ablaca. En las siguientes campañas la parcela cambió y se puso variedad Nudel (1º año) seguido de leguminosa (2º año).



Tabla 15: Nmin en los distintos momentos de muestreo en la campaña 2019 (n=4; letras iguales indican que no hay diferencias significativas según Duncan, p<0,05).

Tratamiento	Nmin presiembra (Kg/ha)	Nmin precobertera (Kg/ha)	Nmin postcosecha (Kg/ha)
TESTIGO	43,1 a $\pm$ 0,0	22,6 a $\pm$ 2,6	29,1 a $\pm$ 5,0
LABINOR N10	43,1 a $\pm$ 0,0	26,4 a $\pm$ 9,5	31,1 a $\pm$ 6,2
ECOFEM	43,1 a $\pm$ 0,0	20,4 a $\pm$ 0,6	30,3 a $\pm$ 3,9
CAL MELEON	43,1 a $\pm$ 0,0	29,6 a $\pm$ 7,6	29,2 a $\pm$ 8,8

Tabla 16: Comparación de medias de Nmin en los distintos momentos de muestreo en las campañas 2020 y 2021 (n=4, letras iguales indican que no hay diferencias significativas según Duncan, p<0,05).

Tratamiento	2020			2021		
	Nmin presiembra (Kg/ha)	Nmin precobertera (Kg/ha)	Nmin postcosecha (Kg/ha)	Nmin presiembra (Kg/ha)	Nmin precobertera (Kg/ha)	Nmin postsiega (Kg/ha)
Testigo	100,2 ^a $\pm$ 2,1	95,7 ^a $\pm$ 10,7	60,8 ^a $\pm$ 9,3	45,8 ^a $\pm$ 5,0	-	51,7 ^b $\pm$ 10,1
Labinor ahijado	104,3 ^a $\pm$ 5,8	121,7 ^a $\pm$ 9,9	54,1 ^a $\pm$ 4,0	54,2 ^a $\pm$ 3,5	-	50,2 ^{ab} $\pm$ 2,1
Ecofem ahijado	98,4 ^a $\pm$ 3,8	132,2 ^a $\pm$ 17,9	57,7 ^a $\pm$ 5,3	53,0 ^a $\pm$ 5,5	-	52,3 ^{ab} $\pm$ 3,3
CalMeleon encañado+ espigado	94,7 ^a $\pm$ 6,1	62,4 ^b $\pm$ 5,2	61,3 ^a $\pm$ 7,5	50,1 ^a $\pm$ 7,0	-	43,8 ^{ab} $\pm$ 5,9
Labinor encañado	106,9 ^a $\pm$ 5,8	58,5 ^b $\pm$ 4,0	59,4 ^a $\pm$ 8,2	52,7 ^a $\pm$ 2,0	-	48,4 ^{ab} $\pm$ 9,5
Ecofem encañado	114,7 ^a $\pm$ 10,2	60,6 ^b $\pm$ 7,4	70,7 ^a $\pm$ 5,8	55,2 ^a $\pm$ 5,3	-	65,8 ^{ab} $\pm$ 12,2
Cal Meleon encañado	100,7 ^a $\pm$ 7,5	60,6 ^b $\pm$ 3,0	51,2 ^a $\pm$ 4,6	54,5 ^a $\pm$ 5,0	-	62,0 ^a $\pm$ 6,3

Para el año 2019, el análisis de varianza no mostró diferencias significativas entre los tratamientos en ningún momento de muestro. El Nmin en el suelo fue similar con independencia del tratamiento aplicado.

Los datos aportados por el 2020 muestran como en presiembra y poscosecha no hubo diferencias significativas entre tratamientos. Por el contrario, en pre cobertera se detecta un valor medio superior en los tratamientos aplicados en ahijado en comparación con los aplicados en encañado. Esto se debe a que el cultivo ha estado más tiempo tomando Nmin, por eso los valores en encañado son menores. A pesar de esto, esta diferencia no se aprecia en pos cosecha, y tampoco se aprecian diferencias dentro de los mismos momentos.

Los datos de 2021 solo aportan información en pre siembra y pos siega. En pre siembra no se observan diferencias significativas entre tratamientos. Esto podría ser esperable ya que se partía de una situación homogénea (Nmin pos cosecha 2020). Sin embargo, en pos siega, si se mostraron diferencias significativas entre 2 tratamientos, siendo las parcelas que había recibido la campaña anterior Cal Meleon en encañado las que tenían mayor Nmin en el suelo tras la siega en comparación con las parcelas que no habían recibido ningún tratamiento fertilizante. Será interesante ver cómo avanza en este sentido la rotación puesto que Cal Meleon es un fertilizante foliar.

XII. Determinación de la biomasa (Obj A.11):

La biomasa calculada (N extraído) tiene las mismas características de cálculo que las aplicadas al Nmin; 1º campaña variedad Ablaca y distinta parcela, 2º campaña variedad Nudel, 3º campaña veza-avena. En esta última campaña, al ser año de cultivo alternativo en la rotación, no se tomaron muestras de biomasa y por tanto no se ha podido estimar la cantidad de nitrógeno extraído. Este dato se tomará el año que viene con el fin de la rotación y con un cultivo de trigo.



Tabla 17: N extraído por el cultivo (biomasa) a final de campaña (cosecha) en función de los distintos tratamientos aplicados para todas las campañas del proyecto (n=4; letras iguales indican que no hay diferencias significativas según Duncan, p<0,05).

Tratamiento	2019	2020	2021
	N extraído (Kg/ha)	N extraído (Kg/ha)	N extraído (Kg/ha)
Testigo	183,5 a $\pm$ 19,4	126,8 ab $\pm$ 1,5	-
Labinor ahijado	-	131,1 ab $\pm$ 1,4	-
Ecofem ahijado	-	132,3 ab $\pm$ 1,9	-
Cal Meleon encañado + espigado	-	116,1 b $\pm$ 0,6	-
Labinor encañado	193,0 a $\pm$ 4,2	156,7 a $\pm$ 1,6	-
Ecofem encañado	181,8 a $\pm$ 17,1	135,9 ab $\pm$ 2,5	-
Cal Meleon encañado	177,8 a $\pm$ 20,4	129,2 ab $\pm$ 1,6	-

Independientemente del N extraído esta campaña, para años anteriores, en 2019 no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos mientras que en 2020 sí. Para esta campaña, las parcelas con tratamiento Labinor en encañado, mostraron una mayor extracción de nitrógeno en comparación con las parcelas que habían recibido Cal Meleon en encañado y espigado. Esto puede tener sentido ya que este último tratamiento (foliar) recibió menor dosis de UFN al tener en principio, una mayor eficiencia en el uso del N.

XIII. Cálculo del balance de nitrógeno del sistema suelo-planta (Obj A.13):

Se realizó un balance de nitrógeno simplificado basado en la aplicación de la ecuación general de conservación de la masa (Meisinger y Randall, 1991), que comprendía los siguientes términos:

$$\text{Balance de N} = \text{N entradas} - \text{N salidas}$$

Considerando las entradas y las salidas como se muestra a continuación:

- N entradas:
 - N min pre-siembra
 - N fertilizante
 - N mineralizado
- N salidas:
 - N min post-cosecha
 - N extraído cultivo
 - N lixiviado

Como se ha visto anteriormente, se cuantificó el nitrógeno mineral (nitratos y amonio) en tres momentos; pre-siembra, pre-cobertura y post-cosecha, y a tres profundidades (0-15, 15-30 y 30- 60 cm). El nitrógeno fertilizante corresponde al nitrógeno amoniacal aplicado con cada abono orgánico. El nitrógeno mineralizado por el suelo se estimó igualando el balance a cero y tomando los datos del tratamiento testigo, en el que no se aplicó ningún tipo de abono nitrógeno en cobertura. Se cuantificó el nitrógeno extraído por el cultivo en pre-cobertura y en el momento de cosecha. El nitrógeno lixiviado no se calculó.

En cuanto al balance de nitrógeno se observó en las campañas 2019 y 2020 que en todos los parámetros que se tuvieron en cuenta como entradas y salidas de nitrógeno, las diferencias fueron pequeñas tal y como se muestra en las siguientes tablas (Tabla 18 y 19 respectivamente). El balance de los tratamientos fue ligeramente positivo en todos los casos y sin diferencias significativas entre ellos. En la campaña 2021 no se pudo hacer una estimación del balance por las razones expuestas anteriormente.



Tabla 18. Balance de Nitrógeno presentando las entradas y salidas de N en la campaña 2019 (n=4; letras iguales indican que no hay diferencias significativas según Duncan, $p < 0,05$).

Tratamiento	ENTRADAS			SALIDAS			BALANCE
	N min presembrado (kg/ha)	N fertilizante (kg/ha)	N mineralizado (kg/ha)	N min extraído (kg/ha)	N min postcosecha (kg/ha)	N lixiviado (kg/ha)	Balance N (kg/ha)
Testigo	43,1 a $\pm$ 0,0	0,6 b $\pm$ 0,0	178,2 a $\pm$ 0,0	183,5 a $\pm$ 19,4	29,1 a $\pm$ 5,0	0,00	9,4 a $\pm$ 19,1
Labinor encañado	43,1 a $\pm$ 0,0	4,4ab $\pm$ 0,0	178,2 a $\pm$ 0,0	193,0 a $\pm$ 4,2	31,1 a $\pm$ 6,2	0,00	1,6 a $\pm$ 3,9
Ecofem encañado	43,1 a $\pm$ 0,0	8,1 a $\pm$ 0,0	178,2 a $\pm$ 0,0	181,8 a $\pm$ 17,1	30,3 a $\pm$ 3,9	0,00	17,4 a $\pm$ 17,7
Cal Meleon encañado	43,1 a $\pm$ 0,0	0,6 b $\pm$ 0,0	178,2 a $\pm$ 0,0	177,8 a $\pm$ 20,4	29,2 a $\pm$ 8,8	0,00	14,9 a $\pm$ 22,5

No se muestran diferencias significativas en el balance de N en función de los distintos tratamientos fertilizantes para la campaña 2019.

Tabla 19. Balance de Nitrógeno presentando las entradas y salidas de N en la campaña 2020 (n=4; letras iguales indican que no hay diferencias significativas según Duncan, $p < 0,05$).

Tratamiento	ENTRADAS			SALIDAS			BALANCE
	N min presembrado (kg/ha)	N fertilizante (kg/ha)	N mineralizado (kg/ha)	N min extraído (kg/ha)	Nmin postcos (kg/ha)	N lixiviado (kg/ha)	Balance N (kg/ha)
Testigo	100,2 ^a $\pm$ 2,1	0,00 ^b $\pm$ 0,0	87,38 ^a $\pm$ 0,0	126,8 ^{ab} $\pm$ 8,6	60,8 ^a $\pm$ 9,3	0,00	0,00 ^a $\pm$ 16,1
Labinor ahijado	104,3 ^a $\pm$ 5,8	3,75 ^{ab} $\pm$ 0,0	87,38 ^a $\pm$ 0,0	131,1 ^{ab} $\pm$ 8,2	54,1 ^a $\pm$ 4,0	0,00	10,30 ^a $\pm$ 6,8
Ecofem ahijado	98,4 ^a $\pm$ 3,8	7,50 ^a $\pm$ 0,0	87,38 ^a $\pm$ 0,0	132,3 ^{ab} $\pm$ 10,8	57,7 ^a $\pm$ 5,3	0,00	3,20 ^a $\pm$ 9,5
Cal Meleon encañado + espigado	94,7 ^a $\pm$ 6,1	0,00 ^b $\pm$ 0,0	87,38 ^a $\pm$ 0,0	116,1 ^b $\pm$ 3,1	61,3 ^a $\pm$ 7,5	0,00	4,60 ^a $\pm$ 0,9
Labinor encañado	106,9 ^a $\pm$ 5,8	3,75 ^{ab} $\pm$ 0,0	87,38 ^a $\pm$ 0,0	156,7 ^a $\pm$ 10,2	59,4 ^a $\pm$ 8,2	0,00	-18,1 ^a $\pm$ 15,7
Ecofem encañado	114,7 ^a $\pm$ 10,2	7,50 ^a $\pm$ 0,0	87,38 ^a $\pm$ 0,0	135,9 ^{ab} $\pm$ 14,8	70,7 ^a $\pm$ 5,8	0,00	2,9 ^a $\pm$ 9,8
Cal Meleon encañado	100,7 ^a $\pm$ 7,5	0,00 ^b $\pm$ 0,0	87,38 ^a $\pm$ 0,0	129,2 ^{ab} $\pm$ 8,9	51,2 ^a $\pm$ 4,6	0,00	7,8 ^a $\pm$ 19,5

A pesar de no encontrar diferencias significativas, se observa como las parcelas fertilizadas con Labinor en encañado, han tenido una media negativa. Esto, a pesar del error que tiene, podría estar relacionado con el hecho de que este tratamiento también fue el que mostró una media de extracción de N más elevada.

Los resultados de la campaña que viene serán de vital importancia para poder obtener conclusiones en cuanto al uso de distintos fertilizantes y su relación con la dinámica del nitrógeno y los parámetros de calidad del grano.

Bibliografía

- Alvarenga, P., Mourinha, C., Farto, M., Santos, T., Palma, P., Sengo, J., Morais, M. C., & Cunha-Queda, C. (2015). Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors. *Waste Management*, 40, 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.027>
- Apesteguía, M.; Virto, I.; Orcaiz, L.; Bescansa, P.; Enrique, A.; Imaz, M.J.; Karlen, D.L. 2017. Tillage Effects on Soil Quality after Three Years of Irrigation in Northern Spain. *Sustainability* 9(8): 1476.
- FAO-UNESCO Soil Map of the World. Available online: <http://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/faounesco-soil-map-of-the-world/en/#>
- Fernandez-Ugalde, O.; Virto, I.; Barre, P.; Gartzia-Bengoetxea, N.; Enrique, A.; Imaz, M.J.; Bescansa, P. 2011. Effect of carbonates on the hierarchical model of aggregation in calcareous semi-arid Mediterranean soils.



Geoderma 164: 203-214.

- Kidd, P. S., Domínguez-Rodríguez, M. J., Díez, J., & Monterroso, C. (2007). Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long-term application of sewage sludge. *Chemosphere*, 66(8), 1458–1467. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.09.007>
- Imaz, M.J., I. Virto, P. Bescansa, A, Enrique, O. Fernández-Ugalde, D.L. Karlen. 2010. Tillage and residue management effects on semi-arid Mediterranean soil quality. *Soil & Tillage Research* 107: 17-25.
- Meisinger, J.J, Randall, G.W.1991. Estimating nitrogen budgets for soil-crop systems. In: Follett, R.F., Keeney, D.R., Cruse, R.M. (Eds.) *Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability*. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Rowley et al., 2018. Calcium-mediated stabilization of soil organic carbon. *Biogeochemistry* 137:27–49.
- Urra, J., Alkorta, I., Mijangos, I., Epelde, L., & Garbisu, C. (2019). Application of sewage sludge to agricultural soil increases the abundance of antibiotic resistance genes without altering the composition of prokaryotic communities. *Science of the Total Environment*, 647, 1410–1420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.092>



INFORMACIÓN CIENTÍFICA Y TÉCNICA PROPORCIONADA POR EL PROYECTO. POSIBLES APLICACIONES

Ensayo Arazuri;

Gracias a este ensayo de larga duración (inicio 1992) se ha podido profundizar en varios aspectos relacionados con las características físico químicas del suelo, así como la utilización de lodos de depuradora como fertilizante orgánico.

Por un lado, se han encontrado diferencias significativas en función de la cantidad y frecuencia de lodo aplicada en distintas propiedades del suelo, profundizando en el conocimiento de cómo este (debido principalmente a cantidad de materia orgánica que posee) puede influir en distintas propiedades, produciendo en ocasiones mejoras en las propiedades del suelo.

Se ha profundizado en el estudio de la porosidad, haciendo hincapié en el número, tamaño y distribución de los poros mediante láminas delgadas, un análisis complejo y novedoso que aporta conocimiento sobre las características microbiológicas del suelo.

Por último, se ha podido profundizar en la acumulación y biodisponibilidad que se da en el suelo de varios metales pesados, como consecuencia de la aplicación repetida de lodos. Del mismo modo, se ha profundizado en la cadena de valor de los alimentos (humano y animal), con el estudio de la posible translocación de estos metales al cultivo (grano – paja). De esta forma, se ha contribuido al estudio de posibles consecuencias toxicológicas en la salud humana y animal.

Todo ello contribuye no solo al estudio, si no a un mayor valor en los asesoramientos a los agricultores en el uso de lodos como fertilizante orgánico, el cual supone una alternativa frente a los fertilizantes inorgánicos. Con esta información, se podrán mejorar los planes de fertilización no solo para obtener mejores cosechas, sino también para mejorar las propiedades intrínsecas del suelo, así como su microbiología contribuyendo al mantenimiento de la fertilidad de los suelos y evitando una posible contaminación por metales pesados.

Ensayo Sartaguda;

Se ha profundizado en el conocimiento de distintos planes de fertilización en cereales destinados a aumentar la calidad harino panadera en ecológico, mercado en pleno auge y expansión.

También se ha contribuido a una mejor explicación de la dinámica del N suelo-planta aportado por fertilizantes orgánicos certificados en ecológico, en un clima semiárido y con un sistema de riego por inundación.

Cualquiera de estos conocimientos, servirá como apoyo científico para el asesoramiento de agricultores en agricultura ecológica.