

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Impacto ambiental de diferentes biofertilizantes respecto al manejo convencional del cultivo de trigo: Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero y el secuestro edáfico de C



Alumno:

Miguel Antonio Gutiérrez Campillo

Director: Luciano Orden

Coodirector: Jose Antonio Saez Tovar

2023



UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

Se autoriza al alumno **D. Miguel Antonio Gutiérrez Campillo**, a realizar el Trabajo Fin de Máster titulado: "Impacto ambiental de diferentes biofertilizantes respecto al manejo convencional del cultivo de trigo: Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero y el secuestro edáfico de C", bajo la dirección de D. José Antonio Sáez Tovar y de D. Luciano Orden, debiendo cumplir las normas establecidas para la redacción del mismo que están a su disposición en la página Web específica del Master.

Orihuela, 5 de septiembre de 2023

La Directora del Máster Universitario de Investigación en Gestión, Tratamiento y Valoración de Residuos Orgánicos

Fdo.: Concepción Paredes Gil

TRIBUNAL	
FECHA:	
PRESIDENTE:	FIRMA:
VOCAL:	FIRMA:
VOCAL:	FIRMA:

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Impacto ambiental de diferentes
biofertilizantes respecto al manejo
convencional del cultivo de trigo: Evaluación
de las emisiones de gases de efecto
invernadero y el secuestro edáfico de C**

2023

VºBº DIRECTOR

**LUCIA
NO|
ORDEN**

Firmado digitalmente por LUCIANO|ORDEN
Fecha: 2023.09.11 10:26:42 +02'00'

VºBº CODIRECTOR

**JOSE
ANTONIO|
SAEZ|TOVAR**

Firmado digitalmente por JOSE ANTONIO| SAEZ|TOVAR
Fecha: 2023.09.11 10:18:18 +02'00'

ALUMNO

Firmado por MIGUEL
ANTONIO GUTIERREZ
CAMPILLO
el día 11/09/2023 con un
certificado emitido por
ACCVCA-120

REFERENCIAS DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

IDENTIFICACIONES

Autor: Miguel Antonio Gutiérrez Campillo

Título: Impacto ambiental de diferentes biofertilizantes respecto al manejo convencional del cultivo de trigo: Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero y el secuestro edáfico de C

Title: Environmental impact of different biofertilisers compared to conventional wheat crop management: Evaluation of greenhouse gas emissions and soil C sequestration

Director/es del TFM: Luciano Orden y José Antonio Sáez Tovar

Año: 2023

Titulación: Máster Universitario de Investigación en Gestión, Tratamiento y Valorización de Residuos Orgánicos

Tipo de proyecto: Trabajo final de máster

Palabras claves: Biofertilizantes, GEI, Secuestro de Carbono, Manejo Tradicional

Keywords: Biofertilizers, GHG, Carbon Sequestration, Traditional Management

Nº citas bibliográficas: 64

Nº de planos: 0

Nº de tablas: 6

Nº de figuras: 24

Nº de anexos: 1

RESUMEN

El manejo convencional del trigo incluye tratamientos con fertilizantes químicos que presentan ciertas ventajas debido a su alto contenido en nutrientes y a la capacidad para acelerar el crecimiento de los cultivos mejorando así el rendimiento de la producción de grano, este tipo de manejo también tienen desventajas como son los posibles efectos adversos que se generan en el medio ambiente. Pero, en los últimos años han aparecido gran variedad de biofertilizantes con beneficios para los cultivos y con menor impacto para el medio ambiente. Este trabajo trata de evaluar el impacto ambiental que tiene la aplicación de diferentes biofertilizantes en forma de pellets desarrollados a partir de mezclas orgánicas o combinación de orgánico-minerales en un cultivo de trigo, respecto a un manejo convencional, para ello se evaluaron las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (N_2O , CH_4 y CO_2), también se determinó el secuestro de carbono edáfico, midiendo diferentes fracciones de carbono oxidable (Cox 12N, Cox 18N y Cox 24N) de los suelos en la siembra y tras la cosecha, a través del método de Walkley y Black modificado. Por último, también se evaluó el rendimiento de producción de trigo mediante su cosecha, así como el efecto inducido por las diferentes estrategias de fertilización en parámetros agronómicos del suelo, como contenido NTK, pH y CE.

ABSTRACT

Conventional wheat management includes chemical fertiliser treatments, which have certain advantages due to their high nutrient content and ability to accelerate crop growth and improve grain yields, but also have disadvantages such as possible adverse effects on the environment. However, in recent years, a wide variety of biofertilisers with benefits for crops and with less impact on the environment have appeared. This work aims to evaluate the environmental impact of the application of different biofertilisers in the form of pellets developed from organic mixtures or organic-mineral combinations on a wheat crop, compared to conventional management, For this purpose, greenhouse gas (GHG) emissions (N_2O , CH_4 and CO_2) were evaluated, and soil carbon sequestration was also determined by measuring different fractions of oxidisable carbon (Cox 12N, Cox 18N and Cox 24N) in the soil at sowing and after harvest, using the Walkley and modified Black method. Finally, wheat yields at harvest were also evaluated, as well as the effect induced by different fertilisation strategies on soil agronomic parameters such as NTK content, pH and EC.

INFORME DE EVALUACIÓN DE INVESTIGACIÓN RESPONSABLE DE 2. TFM (Trabajo Fin de Máster)

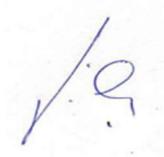
Elche, a 03 de marzo del 2023

Nombre del tutor/a	Luciano Orden
Nombre del alumno/a	Miguel Antonio Gutiérrez Campillo
Tipo de actividad	1. Adherido a un proyecto autorizado
Título del 2. TFM (Trabajo Fin de Máster)	Impacto ambiental de diferentes biofertilizantes respecto al manejo convencional del cultivo de trigo: Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero y el secuestro edáfico de C
Código/s GIS estancias	
Evaluación Riesgos Laborales	No procede
Evaluación Ética	No procede
Registro provisional	230228101459
Código de Investigación Responsable	TFM.MGT.LO.MAGC.230228
Caducidad	2 años

Se considera que la presente actividad no supone riesgos laborales adicionales a los ya evaluados en el proyecto de investigación al que se adhiere. No obstante, es responsabilidad del tutor/a informar y/o formar al estudiante de los posibles riesgos laborales de la presente actividad. La necesidad de evaluación ética del trabajo titulado: Impacto ambiental de diferentes biofertilizantes respecto al manejo convencional del cultivo de trigo: Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero y el secuestro edáfico de C ha sido realizada en base a la información aportada en el formulario online: "TFG/TFM: Solicitud Código de Investigación Responsable (COIR)", habiéndose determinado que no requiere ninguna evaluación adicional. Es importante destacar que si la información aportada en dicho formulario no es correcta este informe no tiene validez. Por todo lo anterior, se autoriza la realización de la presente actividad. Atentamente,



Alberto Pastor Campos
Secretario del CEII
Vicerrectorado de Investigación



Domingo L. Orozco Beltrán
Presidente del CEII
Vicerrectorado de Investigación

Información adicional:

- En caso de que la presente actividad se desarrolle total o parcialmente en otras instituciones es responsabilidad del investigador principal solicitar cuantas autorizaciones sean pertinentes, de manera que se garantice, al menos, que los responsables de las mismas están informados.
- Le recordamos que durante la realización de este trabajo debe cumplir con las exigencias en materia de prevención de riesgos laborales. En concreto: las recogidas en el plan de prevención de la UMH y en las planificaciones preventivas de las unidades en las que se integra la investigación. Igualmente, debe promover la realización de reconocimientos médicos periódicos entre su personal; cumplir con los procedimientos sobre coordinación de actividades empresariales en el caso de que trabaje en el centro de trabajo de otra empresa o que personal de otra empresa se desplace a las instalaciones de la UMH; y atender a las obligaciones formativas del personal en materia de prevención de riesgos laborales. Le indicamos que tiene a su disposición al Servicio de Prevención de la UMH para asesorarle en esta materia.

La información descriptiva básica del presente trabajo será incorporada al repositorio público de Trabajos fin de Grado y Trabajos Fin de Máster autorizados por la Oficina de Investigación Responsable de la Universidad Miguel Hernández. También se puede acceder a través de <https://oir.umh.es/tfg-tfm/>



Índice

1. Introducción	9
1.1. Economía circular y pacto verde: agricultura sostenible	9
1.2. Mitigación del cambio climático en agricultura	10
1.3. Prácticas de manejo tradicional del trigo en zona mediterránea	11
1.4. Prácticas de manejo sostenibles	12
1.5. Fertilización y cambio climático	12
1.5.1. Secuestro de C	12
1.5.2. Emisiones GEI	13
1.5.3. Rendimiento de cultivos	15
1.6. Nuevos biofertilizantes	16
2. Objetivos	17
3. Materiales y Métodos	18
3.1. Descripción del sitio de ensayo y diseño experimental	18
3.2. Parámetros analizados y métodos analíticos	23
3.2.1. Parámetros físico-químicos del suelo	25
3.2.1.1. pH y CE del suelo	25
3.2.1.2. Determinación del NTK	25
3.2.1.3. Concentración de carbono oxidable	25
3.2.2. Determinación de GEI	26
3.2.2.1. Medición de flujos de GEI iniciales y mediciones acumuladas finales	26
3.2.2.2. Determinación del espacio poroso (WFPS)	27
3.2.3. Determinación del rendimiento de trigo	28
3.3. Métodos estadísticos	29
4. Resultados y Discusión	30
4.1. Resultados de suelos	30
4.1.1. Capacidad de enmienda orgánica de nuevos biofertilizantes	30
4.1.2. Stock de C edáfico	31
4.2. Emisiones de gases (GEI)	37
4.2.1. Calentamiento global equivalente	41
4.3. Rendimiento de las plantas de trigo	42
5. Conclusiones	43
6. Bibliografía	44
7. Anexos	49

1. Introducción

1.1. Economía circular y pacto verde: agricultura sostenible

La economía circular se presenta como un modelo de producción y consumo, en el que cuando un producto llega al final de su vida útil, sus componentes se mantienen dentro del sistema productivo, siempre que las condiciones lo permitan, gracias al reciclaje, a la reutilización y a la valorización (Parlamento Europeo, 2022).

El reciclado según la Ley 7/2022 es aquella operación de valorización a través de la cual los componentes de los residuos se reconvierten de nuevo en productos, materiales o sustancias, obteniendo una nueva finalidad o manteniendo la finalidad original.

Por otro lado, la reutilización según la ley anteriormente citada se entiende como una operación en la que los productos o componentes de productos, que no sean residuos, se utilizan con la misma finalidad con la que se concibieron.

Con respecto a la valorización, este concepto está íntimamente relacionado con la economía circular, esta descrito según la legislación de residuos anteriormente citada como una operación cuya finalidad primordial es que el residuo consiga servir a una finalidad útil sustituyendo a otros materiales.

Con este modelo de economía circular, se puede conseguir proteger el medio ambiente al reducir la alteración del paisaje al generar menos residuos y por ello menos vertederos, además de que se consigue reducir los impactos sobre la biodiversidad. Por otro lado, también cabe destacar otro beneficio del modelo de economía circular y es que al necesitar menos productos la fabricación es menor y por tanto se reducirán las emisiones de gases contaminantes.

Se debe mencionar también que con este modelo de economía se consigue reducir la dependencia de las materias primas que empieza a suponer un problema debido a la falta de recursos naturales y a el aumento de la población.

Respecto a la economía circular en el ámbito de la agricultura cabe destacar que los restos de cosecha se utilizan desde tiempos antiguos para la obtención de enmiendas orgánicas mediante el compostaje o para alimentación animal. Pero en la actualidad con las nuevas tecnologías han aparecido una amplia gama de aplicaciones novedosas, de este modo se consigue aportar un valor añadido a la economía.

El Pacto Verde Europeo consiste en un conjunto de planteamientos de carácter político cuya finalidad es establecer una transición ecológica en la UE, cuya meta final es lograr la neutralidad climática para el año 2050. En este Pacto Verde es muy notorio el concepto y la idea de la economía circular, que se materializa a través del Plan de Acción Para la Economía Circular, en este plan se establecen más de treinta medidas en lo referente a el diseño de productos sostenibles, lo circulares que son los procesos de producción y la ganancia de fuerza de los consumidores y compradores públicos (Consejo de la Unión Europea, 2022).

1.2. Mitigación del cambio climático en agricultura

En primer lugar, se debe de tener en cuenta que la agricultura es vulnerable al cambio climático y es fuente de gases de efecto invernadero (GEI), por ello los agricultores se enfrentan a presiones para ajustar los sistemas agrícolas para hacerlos más resistentes frente a un clima que cada vez es más variable y para reducir la producción de GEI (Arbuckle, 2015). El cambio climático se prevé que ocasione varias consecuencias a largo plazo sobre la agricultura como son alteración de los promedios anuales de precipitación, temperatura y humedad, además de que los eventos climáticos serán menos predecibles y más extremos aumentando la frecuencia de inundaciones, sequías e incendios (Hatfield et al.; 2011; Coumou, 2012). Además de lo mencionado anteriormente los impactos destacables que se prevén del cambio climático sobre la agricultura son la redistribución de la disponibilidad de agua, la disminución de la calidad del agua, el incremento de la erosión del suelo y un impacto muy destacable sobre la agricultura será la disminución de la productividad de los cultivos, que conllevará consecuencias económicas para los agricultores (Howden et al., 2007; McCarl, 2010). En cuanto a generación de GEI por parte de la actividad agraria cabe destacar que su impacto no es apreciable a corto plazo, pero se debe de mencionar que estas emisiones comprenden entre un 10% y un 15% de las emisiones mundiales de origen antropogénico, dentro de estas emisiones están incluidos el óxido nitroso (N_2O), el metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2) (IPCC, 2007; Grupo de Trabajo sobre la Declaración de Posición sobre el Cambio Climático, 2011).

Antes de centrarnos en el concepto de mitigación de los efectos del cambio climático en la agricultura se debe de tener en cuenta el concepto de adaptación. En primer lugar, se debe de conocer que los conceptos de adaptación y mitigación presentan cierta relación, si nos centramos en la adaptación, esta se basa en iniciativas y medidas que tratan de reducir la vulnerabilidad que tienen los sistemas naturales y humanos ante los efectos actuales y esperados del cambio climático (IPCC, 2007). Por otro lado, la mitigación del cambio climático en la agricultura se centra en el cambio tecnológico y en la sustitución para reducir la entrada de recursos y las emisiones de GEI (IPCC, 2007), además de buscar aumentar la captura y almacenamiento de carbono (IPCC, 2007).

Como conclusión respecto a estos dos conceptos se puede decir que mientras que la adaptación se plantea a nivel individual o en comunidades y centrándose en amenazas específicas, la mitigación se establece a nivel nacional o internacional y se gestiona a nivel gubernamental (Klein et al., 2007).

1.3. Prácticas de manejo tradicional del trigo en zona mediterránea

En primer lugar, se debe tener en cuenta cómo es el ciclo fenológico de la planta de trigo, esta evolución consta de tres periodos, que son; periodo vegetativo, periodo reproductivo y periodo de maduración. El primer periodo transcurre desde la siembra hasta que se produce el encañado o el crecimiento del tallo, el segundo periodo, que es el reproductivo, empieza en el encañado y llega hasta la terminación del espigado, por último, tenemos la fase de maduración, en la que se produce la acumulación del almidón en el grano y transcurre desde el final del espigado hasta la recolección (Valera, 2014).

El cultivo del trigo de forma tradicional se caracteriza porque se siembra cada dos años, dejando un año de barbecho en el que no se siembra nada, de modo que este año servía de descanso para el suelo, en el que este se podrá airear y se podrían reponer los nutrientes.

Se debe mencionar que el uso de fertilizantes químicos, usados en el manejo convencional del trigo, presenta importantes ventajas como son su alto contenido en nutrientes y la capacidad para acelerar el crecimiento de los cultivos, pero también son destacables los posibles peligros que generan estos fertilizantes para la salud humana y para el medio ambiente sino se manejan de manera adecuada con criterios agronómicos de dosificación.

1.4. Prácticas de manejo sostenibles

La utilización de prácticas de manejo sostenible como sustituto de las prácticas agrícolas tradicionales han aparecido por múltiples motivos, de ellos cabe destacar el aumento de los costos de producción que está causado por factores externos a la explotación o también denominados inputs (como fertilizantes, piensos, combustibles, productos fitosanitarios o semillas). Estos inputs resultan cada vez más costosos y han generado en la agricultura una dependencia de ellos. Otro motivo del auge de agricultura sostenible es la aparición de problemas en resistencias a los productos fitosanitarios, de malas hierbas, insectos y otros organismos. Por último, también es de destacar otro motivo del importante desarrollo de la agricultura sostenible, consiste en el uso de gran cantidad de productos químicos y de técnicas que son causantes de contaminaciones de aguas subterráneas y superficiales, además de afectar de forma importante a la fauna silvestre y a la salud humana (Villalba, 1994). Es importante destacar que la agricultura tradicional, con unos usos intensivos de la tierra, generan una importante pérdida de hábitats y biodiversidad de especies, además de la mala gestión del agua que genera anegamiento y salinización del suelo y del consumo de combustibles fósiles por parte de la maquinaria agrícola. Todo ello motiva a utilizar la agricultura sostenible frente a la agricultura tradicional (Fakhrul et al, 2019).

Frente a todo lo mencionado anteriormente, se presenta la agricultura sostenible que se caracteriza por la utilización de varias prácticas de manejo a destacar, como son la fertilización orgánica de origen vegetal o animal para establecer un control de la fertilidad del suelo. Por otro lado, otra práctica de manejo de la agricultura sostenible a destacar es la utilización de organismos beneficiosos, la realización de rotaciones de cultivo y de medios mecánicos para permitir defender los cultivos frente a las malas hierbas, plagas o enfermedades. Otras prácticas que también incluye la agricultura sostenible es el empleo de productos químicos, pero de forma racionalizada y el manejo integrado de plagas (Villalba, 1994).

1.5. Fertilización y cambio climático

1.5.1. Secuestro de C

En primer lugar, se debe establecer el concepto de sumidero de carbono, que está definido como el proceso o la actividad que implica la sustracción de GEI de la atmósfera. A largo plazo, la conversión que han sufrido áreas de pastizales y forestales, en zonas de cultivo han propiciado unas reducciones históricas del carbono del suelo a nivel mundial.

El secuestro de carbono orgánico es primordial para el ciclo global del carbono y se puede utilizar para contrarrestar los aumentos de las emisiones de CO₂ de origen antropogénico (Parr, 2005). En términos de cantidad total, el ciclo del carbono terrestre está dominado por el carbono orgánico del suelo, pero el secuestro del carbono orgánico a largo plazo es relativamente bajo (~0,7% de la producción primaria neta) (Schlesinger, 1990).

Se debe de mencionar también que en el suelo se almacenan grandes cantidades de carbono, siendo estas cantidades el doble que en la atmosfera y tres veces más que en la biomasa de la tierra (Schlesinger, 2000).

El objetivo final del secuestro del carbono es revertir la degradación de los suelos, que han sido generados por un mal manejo de las tierras mediante la promoción de prácticas de manejo mejorados y promoción de nuevos sistemas de uso (FAO,2023).

Los suelos de las zonas secas, como la estudiada en este trabajo, tienen un gran potencial para secuestrar C y generarán externalidades regionales y globales positivas. Durante la próxima década, la investigación sobre la gestión del C en zonas áridas debería centrarse en prácticas adecuadas de gestión agrícola y ganadera que maximicen el almacenamiento de C en los suelos teniendo en cuenta toda su huella de C (Plaza-Bonilla et al, 2015).

1.5.2. Emisiones GEI

En 2018 se alcanzó un récord de emisiones de GEI con 55,3 Gt de CO₂eq emitidos en un año (PNUMA, 2019), esto muestra que el impacto antropogénico sobre el sistema climático ha ido en aumento de año en año (Fig. 1).

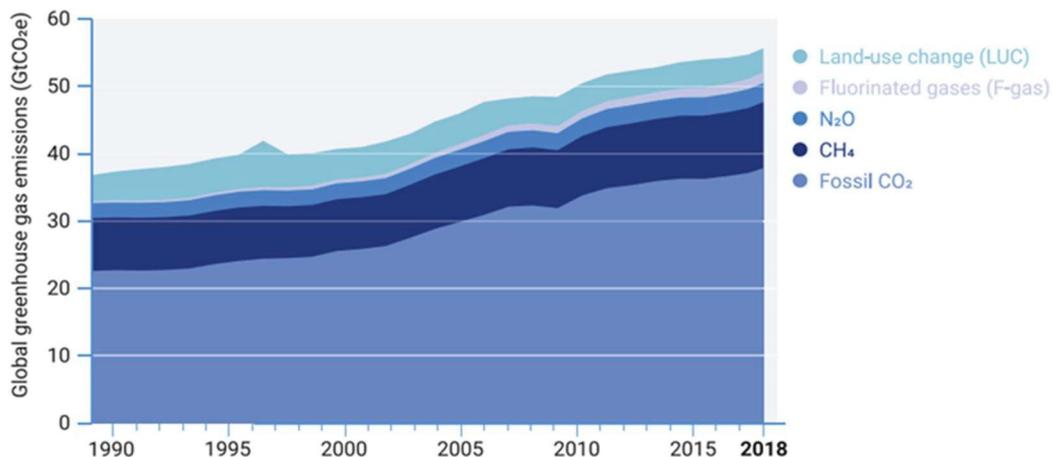


Figura 1. Emisiones globales de gases de efecto invernadero de todas las fuentes. Fuente: Olivier y Peters (2019), Houghton y Nassikas (2017) para emisiones de cambio de uso de la tierra, y Friedlingstein et al. (2019) para actualizaciones

Este aumento de emisiones de GEI general, también se ha observado en el sector agrícola primario, que supone una fuente destacable de emisión de GEI, siendo el sector agrícola, silvícola y de otros usos de la tierra un 24% de las emisiones totales de GEI (AFLOU)(IPCC, 2014) (Fig. 2). Este incremento se debe principalmente a el crecimiento de la población, que aumenta la demanda de alimentos. Todo ello hace necesario el desarrollo de la agricultura y favorece la utilización de agricultura intensiva, lo que concentra grandes emisiones de GEI en áreas pequeñas (Mielcarek, 2018).

Es importante también mencionar que las emisiones de CH₄ de la fermentación entérica y las emisiones de N₂O de los suelos son responsables de más del 80% de las emisiones totales de GEI de origen agropecuario. Las emisiones de CH₄ procedentes de la gestión del estiércol suponen alrededor de un 10% y el resto de las fuentes representan porcentajes inferiores al 10% de las emisiones de GEI de origen agrícola globales (EEA, 2022). También se ha observado que la agricultura es la mayor fuente de CH₄ y N₂O (Blandford, 2018).

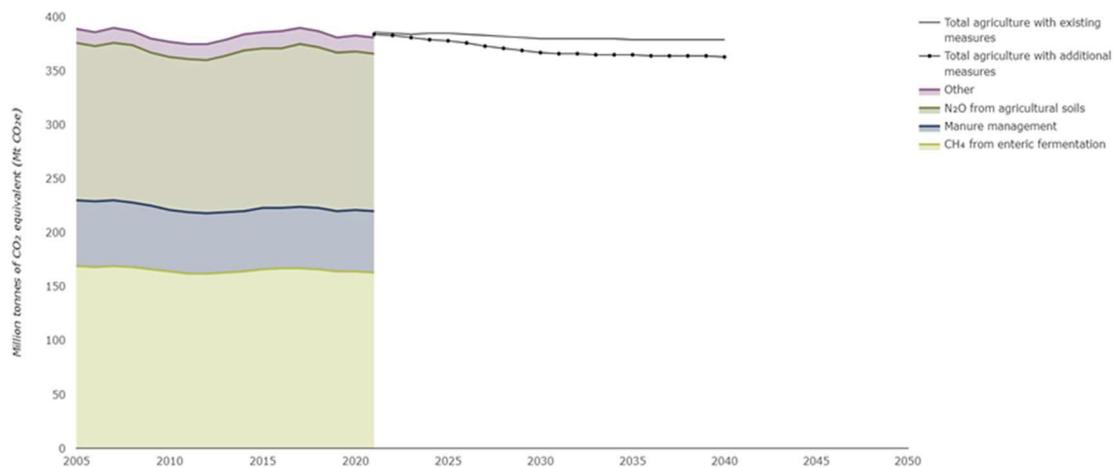


Figura 2. Emisiones agrícolas de la UE por fuente y emisiones proyectadas. Fuente: EEA

La relación existente entre la aplicación de fertilizante y el calentamiento global se da, debido a que cuando se aplica un fertilizante, este es transformado en nutrientes por las plantas y por el suelo, este proceso de transformación genera algunos subproductos, de entre ellos cabe destacar los GEI (CO₂, N₂O y CH₄), que son los gases que aceleran el calentamiento global. Si se aplican las cantidades adecuadas de fertilizante, la cantidad de emisiones de GEI serán mínimas y las plantas crecerán, pero en cambio, si las cantidades de fertilizante son demasiado elevadas, las plantas no podrán ser capaces de procesarlo y quedarán restos de esos fertilizantes en el suelo, por ello las emisiones aumentarán de forma importante (Mikhailova, 2018).

1.5.3. Rendimiento de cultivos

En los últimos años se está observando que el cambio climático mundial se está haciendo cada vez más notable, este fenómeno tiene efectos en muchos procesos y ciclos naturales, pero también tiene influencia y afecta a actividades antrópicas como es la agricultura. La agricultura es fundamental para el ser humano y por ello se le debe de prestar atención a las afecciones que están alterando y que podrían ser causadas por el cambio climático.

Existen varios trabajos y artículos que explican las relaciones existentes entre el cambio climático que se está produciendo y el rendimiento de los cultivos. Se utilizan un conjunto de ecuaciones en la simulación de los cultivos y se han desarrollado modelos de simulación de cultivos para permitir la predicción del rendimiento del cultivo con antelación, simulando el clima y otros factores afectan a los cultivos (Hui et al., 2013). Los resultados que se obtuvieron muestran que un aumento del CO₂ atmosférico tuvo efecto positivo sobre las tasas fotosintéticas, lo que lleva a una mejora del rendimiento y la eficiencia en el uso del agua. Sin embargo, la elevada concentración de CO₂ provocará el cierre de los estomas y reducirá la evaporación de la planta (Parry et al., 2005). Se debe tener en cuenta que las simulaciones se establecieron normalmente sin ninguna limitación de agua y de fertilizantes. Es necesario mencionar que todavía se necesitan más experimentos de campo prácticos para establecer una conclusión de los efectos del aumento de las concentraciones de CO₂ sobre el rendimiento de los cultivos. A todo esto, es importante mencionar que las tecnologías actuales podrían usarse para combatir los efectos adversos del cambio climático. Sin embargo, los rendimientos de los cereales han mostrado reciente desaceleración considerable del crecimiento en Europa, lo que indica que el cambio climático puede desempeñar un papel más importante en futuro que el progreso tecnológico (Kristensen et al., 2011).

1.6. Nuevos biofertilizantes

Unos nuevos tipos de biofertilizantes son los abonos órgano minerales que son productos cuya función principal es aportar nutrientes para las plantas, los cuales son de origen orgánico y mineral, y se obtiene por mezcla o combinación química de abonos inorgánicos con materiales carbonados de origen animal o vegetal o abonos orgánicos (BOE, 2013). Existen varios trabajos que han utilizado abono órgano minerales como fertilizantes, entre ellos destaca un artículo sobre el uso de un fertilizante órgano-mineral obtenido de lodos de depuradora que se aplicó en una zona de cultivo (maíz forrajero, cebada de invierno, frijol fuego, trigo de invierno, trigo de primavera, colza y mezcla de raigrás) en Inglaterra y que se comparó con la aplicación en esa misma área con el uso de fertilizantes convencionales. Los resultados obtenidos muestran que en algunos casos el fertilizante órgano-mineral, influyó positivamente (Deeks et al, 2013).

Los compost pelletizados son un tipo de fertilizante que se obtienen mediante el proceso de pelletización que se basa en la compresión del material a una forma más densificada (Fig. 3). La pelletización presenta múltiples ventajas que facilitan su manejo, generan menor costes de transporte y permiten una dosificación más precisa en el suelo (Ferrari et al., 2022). También se debe tener en cuenta que cuando los abonos en forma de pellets no cumplen con los requisitos legales para su utilización como fertilizantes, pueden tener otros usos como son la obtención de energía mediante su combustión (Zajonic et al., 2014).

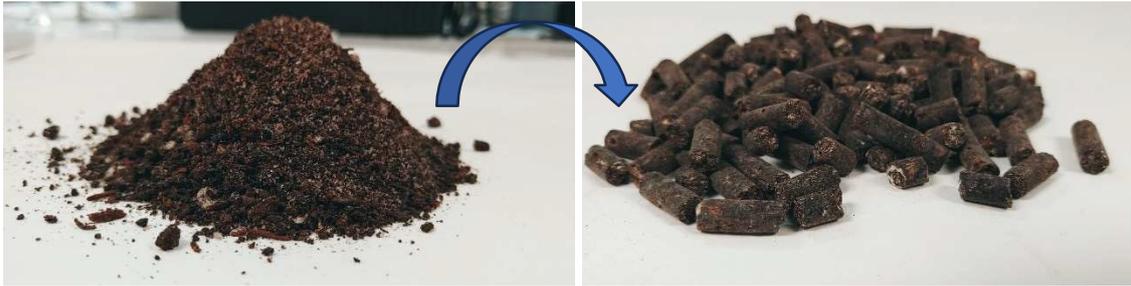


Figura 3. Pellets orgánico-minerales obtenidos a base de compost.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo consiste en el estudio de los efectos de algunas propiedades edáficas que tiene la utilización de diferentes tipos de biofertilizantes pelletizados realizados a partir del enriquecimiento con fuentes orgánicas y fuentes minerales, comparados a su vez con el uso de fertilizantes orgánicos frescos (lodo de depuradora y purín de cerdo), con respecto a la realización de un manejo convencional utilizando fertilización inorgánica de síntesis química en un cultivo extensivo de trigo (*Triticum turgidum* L. Subsp. *Durum* var. *Sculptur*) (Fig. 4):

Este objetivo principal a su vez se divide en los siguientes objetivos parciales:

1. Estudio de la evolución de las propiedades físico-químicas del suelo.
2. Estudio y comparación entre los diferentes tipos de estrategias de fertilización en la evolución de las diferentes fracciones del carbono fácilmente oxidable del suelo.
3. Influencia del uso de los diferentes tipos de fertilización en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) (N_2O , CO_2 , CH_4).
4. Evaluación del rendimiento de producción de trigo en función del tipo de fertilizante utilizado.

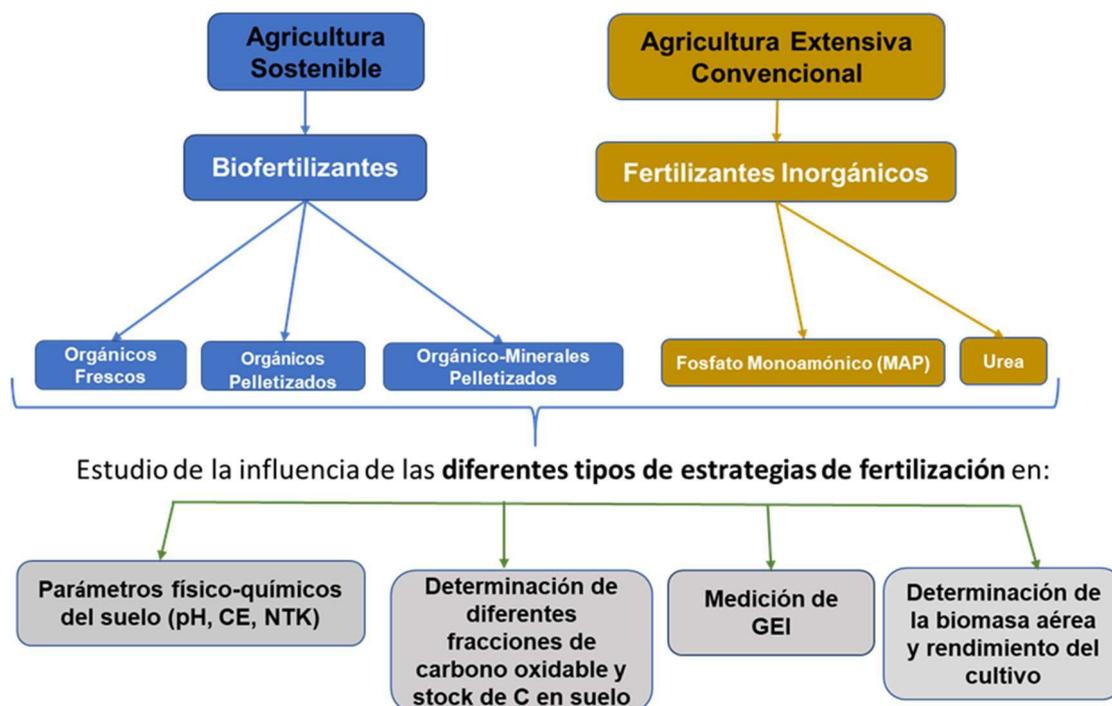


Figura 4. Diagrama conceptual del estudio llevado a cabo

3. Materiales y Métodos

3.1. Descripción del sitio de ensayo y diseño experimental

En la campaña 2022-2023 se realizó un ensayo en condiciones de campo en las instalaciones del CSIC en Zaragoza (Estación Experimental Aula Dei (EEAD)) (1° 43' 16,62"N 0° 48' 52,31" W), sobre un suelo Xerollic Calciorthid térmico (Fig. 5). El suelo de textura franco-fino, se caracterizó por tener un pH de 8,43, CE de 236 $\mu\text{S}/\text{m}$, 1,67% de materia orgánica (MO), en cuanto a la temperatura media durante el ensayo fue de 13,65 °C, (Fig. 6).



Figura 5. Esquema representativo de la zona de estudio en la que se aprecian las parcelas y subparcelas

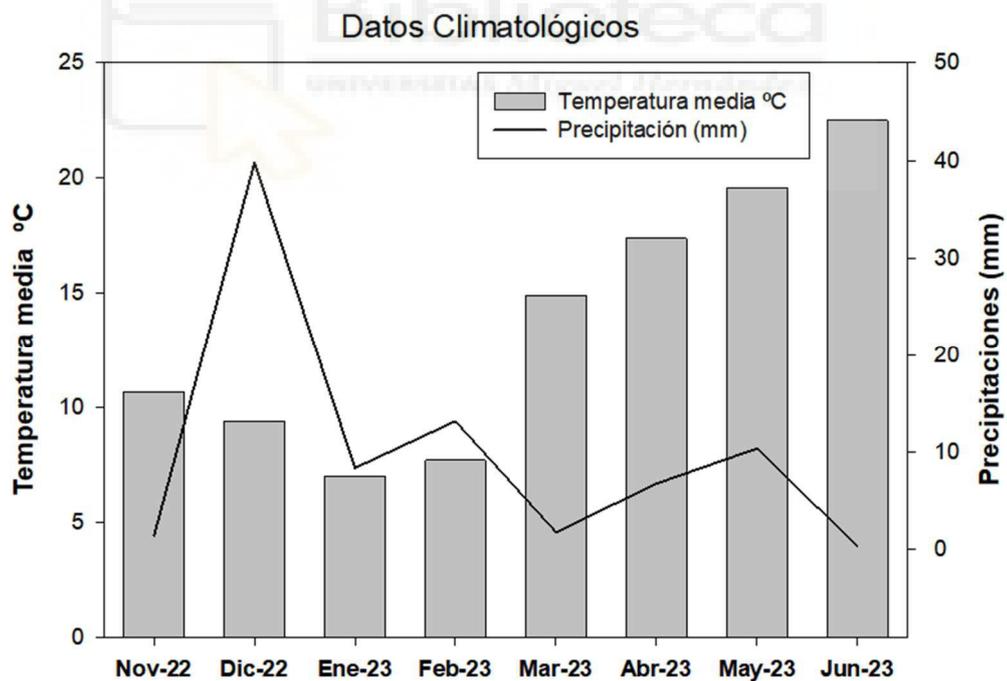


Figura 6. Diagrama ombrotérmico, ciclo de cultivo 2022-2023 en el sitio de ensayo EEAD Aula Dei (CSIC), Zaragoza.

Para el diseño del experimento en campo, se estableció un diseño experimental de bloques completos al azar de 8 tratamientos distintos con 3 repeticiones, incluyendo un control sin fertilizar (tamaño de cada unidad experimental 3 m x 8 m) (Tabla 1), 1) T: testigo sin fertilización, 2) IN: fertilizante inorgánico convencional, 3) PU: purín de cerdo, 4) LO: lodo de depuradora, 5) POM1: pellet en base a compost enriquecido con fuentes minerales de síntesis química, 6) POM2: pellet en base a compost enriquecido con fuentes minerales de síntesis química, 7) PO: pellet en base a compost enriquecido con fuentes orgánicas 8) CP1: pellet de compost y 9) CP2: pellet de compost. La fuente de P inorgánica fue fosfato monoamónico (MAP, 11-52-0) y de N inorgánica fue urea granulada (UREA, 46-0-0).

Grupofert	Tipo de fertilizante	Tratamiento	Referencia
Control	-	1	B
Fosfato monoamónico + Urea granulada	Fertilizante convencional	2	IN
Orgánico fresco	Residuos frescos	3	PU
Orgánico fresco		4	LO
Orgánico mineral- Orgánico mineral	Pellets	5	POM1
Orgánico mineral- Orgánico mineral		6	POM2
Orgánico-Orgánico		7	PO
Compost		8	CP1
Compost		9	CP2

Tabla 2. Tasa de aplicación de nutrientes y fertilizantes						
Fertilizantes aplicados		Tratamiento	Dosis de nutriente (kg/ha)		Dosis de fertilizante (kg/ha)	
Fase de siembra	Fase de macollamiento	Correspondencia	P	N	P	N
-	-	B	-	-	-	-
X	X	IN	50	150	188	326
X	-	PU	-	150	-	37500*
X	-	LO	-	150	-	7500
X	X	POM1	50	150	484	587
X	X	POM2	50	150	683	587
X	X	PO	50	150	556	1594
X	-	CP1	-	150	-	5929
X	-	CP2	-	150	-	9554

*(L/ha)

El día 18/11/2022 se sembró trigo duro con semilla de poder germinativo = 85%, pureza= 98%, a una densidad de 250 kg ha⁻¹, y a una distancia entre surcos de 12.5 cm, bajo labranza convencional y riego por inundación(3 riegos durante el ciclo del cultivo) La fertilización P tanto inorgánica como órgano-mineral se realizó a la siembra de forma manual en superficie, mientras que el N, en todas las estrategias de fertilización, excepto en los tratamientos con fertilizantes orgánicos frescos (purín y lodo) ,se aplicó de forma manual en superficie en un estadio fenológico de dos macollos (Z23) el día 16/02/2023 (Fig. 6),en el caso del purín y el lodo se aplicó al inicio.

El control de malezas y plagas se realizó de forma convencional de acuerdo con las mejores prácticas de manejo de la zona.

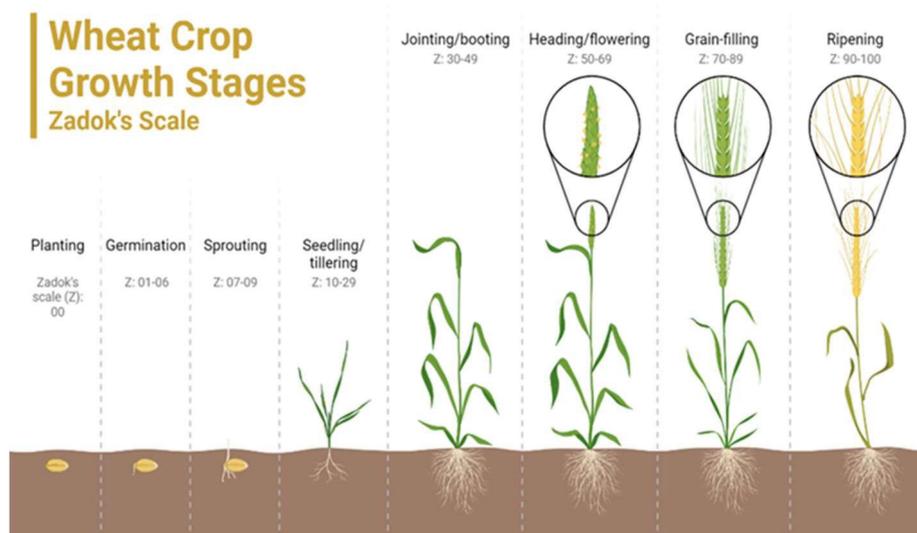


Figura 7. Etapas de crecimiento de Zadoks del trigo de invierno. Fuente: Zadoks et al,1974



10 días desde la siembra



74 días desde la siembra



151 días desde la siembra



199 días desde la siembra (día de cosecha)

Figura 8. Imágenes que muestran la evolución del cultivo de trigo, desde el momento de la siembra hasta la cosecha

3.2. Parámetros analizados y métodos analíticos

El experimento se basó en determinar los efectos de los diferentes tratamientos de fertilización sobre las propiedades físico-químicas del suelo (0-20 cm de profundidad). Estas muestras se tomaron en diferentes puntos de las parcelas y luego se procedió a la homogeneización de una muestra compuesta por parcela (n=27). En el laboratorio las muestras se secaron al aire y se tamizaron por 2 mm (Fig. 9). Todos los análisis se realizaron por triplicado. Las muestras de suelo se tomaron al momento de la siembra (0 días) y en la cosecha (199 días) para determinar los efectos residuales de la fertilización en el suelo. Las características físico-químicas de los abonos orgánicos se analizaron según los métodos descritos por Paredes et al (2015) (Tabla3).



Figura 9. Secado de las muestras finales de suelo en el laboratorio

Tabla 3. Características físico-química de los ingredientes utilizados para la formulación de los fertilizantes aplicados en los diferentes tratamientos

Fertilizantes		pH	EC	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	COT	NT	P	K	MO
			dS /m	mg /kg	mg /kg	g/ kg	g/ kg	g /kg	g /kg	%
Pellets										
Orgánico-Mineral (N)	URC	8,80±1,65	2,51±1,92	45,4±2,91	140±7,37	296±0,91	255±0,57	3,68±4,06	13,6±6,51	77,8±0,71
Orgánico-Mineral (P)	CMAP	5,59±1,61	3,02±2,95	91,6±8,37	106±2,75	216±1,40	70,6±0,9	103±5,3	14,4±1,61	35,5±0,28
Orgánico - Orgánico (N)	CBM	8,30±2,24	2,86±1,92	35,1±15,86	111±3,29	447±0,05	94,1±0,21	3,27±1,02	11,2±0,51	89,4±0,15
Orgánico - Orgánico(P)	CBOM	8,63±1,7	1,88±7,63	48,1±15,25	129±8,30	293±2,56	27,6±0,28	45,7±9,25	15,7±9,49	58,7±0,90
Orgánico - Orgánico (P)	Cst	6,68±1,63	3,88±1,78	27,5±3,57	825±1,20	179±0,38	37,3±0,04	182±1,99	<0,1	39,9±0,79
Orgánicos frescos										
Lodo	LO	6,56±0,43	5,68±0,87	2,63±8,47	8,20±6,07	292±1,02	46,2±0,96	8,03±10,9	2,51±1,02	52,4±0,01
				mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Purín	PU	6,6±0,64	22,4±0,00	2251±0,00	42,7±23,57		2261±0,01	585±4,22	1820±1,54	2,90±0,94
Compost pelletizado										
Compost	CP1	9,05±1,61	3,51±2,34	54,7±0,09	25,5±10,1	386±0,79	25,4±0,49	6,56±0,28	26,9±1,49	79,6±1,17
Compost	CP2	7,61±0,28	4,07±8,18	1,45±0,09	666±5,38	296±1,02	20,0±0,15	17,6±1,77	13,3±2,71	55,3±0,90

3.2.1. Parámetros físico-químicos del suelo

3.2.1.1. pH y CE del suelo

El pH y la conductividad eléctrica (CE) se determinaron de forma potenciométrica en suspensión suelo:agua (p/v) relación 1:2,5 (pH); y 1:5 suelo: agua (CE).

3.2.1.2. Determinación del NTK

El Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) se determinó a través de la transformación del nitrógeno orgánico en amoniacal mediante la digestión de la muestra (Bremmer y Brittembeck, 1983).

3.2.1.3. Concentración de carbono oxidable

Se empleó el método de Walkley & Black estándar (W-B) para la determinación del CO fácilmente oxidable por combustión húmeda (Walkley, 1947). Se repitieron las determinaciones variando el volumen de ácido en el reactivo para obtener concentraciones de H_2SO_4 de 12 N (Cox 12) y 18 N (Cox 18), además del 24 N (Cox 24) que corresponde al W-B(Fig. 10 y 11). Esto permitió comparar el CO oxidable (Cox) bajo condiciones de oxidación creciente (Chan et al. 2001).

El contenido de CO del suelo se calcula multiplicando el porcentaje de carbono oxidable Cox por el factor de recuperación de la técnica seguida, que en este caso es 1,29.

$$\text{Carbono orgánico (\%)} = \text{Carbono oxidable} \times 1,29$$

Utilizando el mismo criterio, anteriormente descrito, el contenido de materia orgánica (MO) se calcula multiplicando el porcentaje de CO por el coeficiente de Van Bemmelen.

$$\text{Materia orgánica (\%)} = \text{Carbono orgánico (\%)} \times 1,724$$



Figura 10. Disoluciones de las muestras de suelo durante la digestión con H_2SO_4



Figura 11. Disoluciones de las muestras de suelo después de la valoración del exceso de $K_2Cr_2O_7$ con $FeSO_4$ 1,0 M

3.2.2. Determinación de GEI

3.2.2.1. Medición de flujos de GEI iniciales y mediciones acumuladas finales

Las mediciones de GEI (N_2O , CH_4 y CO_2) del suelo se realizaron en 14 muestreos (días 0, 7, 21, 29, 49, 64, 80, 87, 97, 114, 141, 161, 170, 199) en todos los tratamientos desde el 28/11/2022 hasta el 26/06/2023, mediante la metodología de cámara estática cerrada conectada a un analizador multigás de espectroscopia infrarroja fotoacústica (One, Gasera Ltd.) (Fig. 12).

La cámara fue construida con acero inoxidable, con un diámetro de 15 cm y una altura de 20 cm, el volumen del espacio de cabeza fue de $3,53 \text{ dm}^3$. Los anillos de acero se clavaron 15 cm en el suelo y se sellaron a la cámara con una junta de goma. El peso de la cámara fue suficiente para asegurar la hermeticidad del espacio de cabeza. Los flujos de GEI se cuantificaron cada minuto durante un período de seis minutos, se rechazaron la primera y la última medición para alcanzar un valor de regresión lineal de $R^2 > 0,9$ (Egene et al., 2022). La tasa de emisión final se expresa como la diferencia entre la cuantificación al final y al comienzo del período de medición dividida por el tiempo. Cada minuto tomamos datos de temperatura del espacio superior de la cámara con un termómetro digital.



1. Base de acero de la cámara estática



2. Gasera y cámara estática



3. Cámara estática en funcionamiento



4. Termómetro digital en la parte superior de la cámara estática

Figura 12. Imágenes de la gasera utilizada para medir los GEI en campo

Las emisiones acumuladas durante el período experimental se calcularon según lo propuesto por Menéndez et al. (2006), multiplicando el flujo medio de dos determinaciones sucesivas por la duración del período entre muestreos y sumando esa cantidad al total acumulado.

4.1.1.1. Determinación del espacio poroso (WFPS)

Este parámetro está relacionado con la aireación y la saturación de agua de un suelo. Si el WFPS es escaso existirá una falta de agua que disminuirá la capacidad de los organismos para respirar y afectará a el ciclo del N en el suelo. En cambio, si el WFPS es elevado existirá una falta de aireación, lo que disminuirá la respiración de los organismos y por otro lado se producirá desnitrificación, lo que genera pérdidas de N en forma de gas y emisión de GEI (USDA, NRCS).

Para determinar el espacio poroso lleno de agua (WFPS) se tomaron muestras de suelo durante todo el experimento y se secaron en estufa a 105 °C durante 48 h.

El porcentaje WFPS se calculó a través de la siguiente relación:

$$\%WFPS = 100 \times \frac{\text{Humedad gravimetrica} \times \text{Densidad aparente}}{\text{Porosidad total}}$$

Donde la porosidad total es:

$$\text{Porosidad total} = 1 - (\text{Densidad aparente} / \text{Densidad de partículas})$$

Densidad de partícula (D_P) → Se asume 2,65 g/cm³

Comúnmente se asume 2,65 g/cm³ de D_P del suelo. Este valor corresponde a la D_P del cuarzo. La D_P de una muestra de suelo se calcula a partir de dos cantidades medidas, el peso y el volumen de las partículas. El peso se determina por pesaje y el volumen por cálculo a partir del peso y densidad del agua (u otro fluido) desplazado por la muestra (Hao et al., 2019).

3.2.3. Determinación del rendimiento de trigo

El día 26/06/2023 se cosechó de forma mecanizada de cada unidad experimental (n=27) para evaluar el rendimiento en grano corrigiéndose por humedad constante (kg/ha). El rendimiento de grano se determinó a través de la cosecha del trigo de 6 m² las parcelas establecidas, mediante una cosechadora de 1,2 m de ancho, pesando el grano y estandarizando los valores al 10% de humedad (Fig. 13 y 14). En el laboratorio se procedió a trillar las espigas de trigo, luego se secaron los granos a 65°C por 48 h y se pesaron.



Figura 13. Cosechadora utilizada para recoger el grano de trigo



Figura 14. Contenedor para recoger y transportar el grano de trigo

3.3. Métodos estadísticos

Para realizar el análisis estadístico de los datos obtenidos se han realizado Análisis de Modelo Lineal (GLM) multivariante. Además, se ha realizado la prueba ANOVA utilizando el contraste Post-hoc hecho con Tukey-b y Duncan a fin de estudiar el efecto sobre las propiedades físico-químicas del suelo, así como en el contenido Cox del mismo se ha realizado el estudio GLM según la variable tipo de tratamiento. Del mismo modo se han agrupado los datos en función de la variable tipo de fertilizante (Control, Inorgánicos, Orgánico-Mineral, Orgánico - Orgánico, Orgánico-Fresco). Se ha utilizado el paquete estadístico IBM SPSS Statistics v24 para todos los test estadísticos.

4. Resultados y Discusión

4.1. Resultados de suelos

4.1.1. Capacidad de enmienda orgánica de nuevos biofertilizantes

Tabla 4. Parámetros y estadística de los suelos analizados por tratamiento.

Tratamientos	pH		CE dS/m		NTK g/kg	
	0 d	199 d	0 d	199 d	0 d	199 d
B	8,4 b	8,4 ab	236 a	452	0,88	0,81
IN	8,4 b	8,5 bc	293 ab	447	0,91	0,86
PU	8,5 bc	8,6 c	284 ab	436	1,00	0,94
LO	8,0 a	8,5 bc	333 b	419	1,08	1,03
POM1	8,5 b	8,3 a	323 b	410	1,04	0,97
POM2	8,7 c	8,4 b	238 a	436	1,01	0,95
PO	8,6 bc	8,4 ab	235 a	458	0,95	0,88
CP1	8,6 bc	8,6 c	252 a	423	0,99	0,92
CP2	8,5 b	8,5 bc	280 ab	426	0,99	0,92
F-ANOVA	13,03 ***	9,59 ***	2,90 *	0,33 ns	0,54 ns	0,66 ns

Las letras después de los datos indican el grupo según prueba pos-hoc Tukey b. ns, no significativo, * sig. $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$

Lo que se puede apreciar en los datos de pH obtenidos de los suelos, es que presentan unos valores ligeramente básicos, además también se puede observar que existe escasa diferencia entre los valores obtenidos en el suelo control y el resto de los suelos con los distintos tratamientos, por lo que se puede decir que ninguno de los fertilizantes aplicados a influido de forma destacable en el pH de los suelos. Por otro lado, tampoco hay una diferencia destacable entre los valores de pH iniciales y finales.

En el caso de los valores de CE, se aprecia un notable incremento de la conductividad atendiendo a la diferencia existente entre los datos de CE iniciales y finales. Este incremento se asocia a un incremento de la salinidad y de los nutrientes del suelo (Smith y Doran, 1996), al aplicar los fertilizantes. Esto podría deberse a la incorporación de sales solubles por agua de riego.

Los datos de NTK iniciales de la Tabla 4, obtenidos de las muestras de suelos muestran una tendencia al aumento para todos los tratamientos respecto a el suelo control, como lo obtenido en el trabajo de (Castejón del Pino, 2018), a excepción del suelo al que se le aplica el tratamiento POM1 que presenta el mismo valor que el control. Los datos iniciales más elevados los presentaron los suelos a los que aplico el tratamiento de PU y el CP2. El caso del elevado valor de los de NTK de los purines puede deberse a que se aplicaron grandes cantidades de este tipo de fertilizante al suelo para poder lograr la dosis de nutrientes necesaria tanto de N como de. Por otro lado, el caso del elevado contenido de NTK generado por el CP2 puede deberse a el mayor aporte de N orgánico por parte de los compost.

Se debe recordar que uno de los limitantes respecto a el uso del compost como fertilizante es la incertidumbre sobre la cantidad de nutrientes que estará disponibles para la planta, especialmente N y P, debido a que ambos pueden estar presentes tanto en forma inorgánica como orgánica, y además pueden estar presentes tanto en formas solubles como insolubles y es posible que no estén disponibles para la planta de manera inmediata (Bernal et al, 2017).

Respecto a los tratamientos orgánicos bioestabilizados la reducción de NTK observada muestra cómo estos fertilizantes orgánicos fueron capaces de ir liberando N inorgánico lentamente combinándose con la necesidad nutricional del cultivo (Sanz-Cobena et al, 2017).

4.1.2. Stock de C edáfico

Los datos obtenidos de % de Cox por fracciones de la Tabla 5 de los distintos suelos muestran, en el caso de los datos iniciales, que la aplicación de tratamientos orgánicos estabilizados como los compost (CP1 Y CP2) y otros tratamientos orgánicos (PO y POM2) aumenta el contenido de materia orgánica resistente a la degradación (Cox 24N), en comparación con el suelo control y el resto de los tratamientos. Es necesario también mencionar que se ha observado un valor inicial muy elevado de C fácilmente degradable con la aplicación del lodo, debido a que presenta un gran contenido en materia orgánica sin estabilizar, si comparamos este valor con el final se observa un importante descenso del % de Cox lábil, esto se debe a que el carbono se ha emitido en forma de CO₂, esto se vera de forma muy notable en la Fig.21 donde se muestra el lodo como el mayor emisor de CO₂.

Tabla 5. Porcentaje de carbono oxidable según el tratamiento y las normalidades de H₂SO₄ aplicadas.

Correspondencia	Cox12N inicio (%)	Cox12N final (%)	Cox18N inicio (%)	Cox18N final (%)	Cox24N inicio (%)	Cox24N final (%)
B	0,20	0,24	0,32 a	0,36 b	0,75 ab	0,81 ab
IN	0,19	0,22	0,34 ab	0,31 a	0,69 a	0,80 ab
PU	0,21	0,20	0,38 bc	0,31 a	0,81ab	0,83 ab
LO	0,40	0,22	0,34 ab	0,31 a	0,83 ab	0,80 ab
POM1	0,17	0,25	0,32 a	0,32 a	0,85 ab	0,78 a
POM2	0,13	0,20	0,36 abc	0,32 ab	0,87 ab	0,83 ab
PO	0,18	0,25	0,35 ab	0,31 a	0,90 ab	0,82 ab
CP1	0,15	0,22	0,39 bc	0,36 b	0,91 b	0,92 b
CP2	0,22	0,21	0,41 c	0,35 b	1,03 c	0,93 b
F -ANOVA	1,07 ns	1,2 ns	4,747 **	2,85 *	2.182 *	4,68 **

Las letras después de los datos indican el grupo según prueba pos-hoc Tukey b. ns, no significativo, * sig. p<0,05, **p<0,01, *** p< 0,001

Si comparamos los datos de los suelos finales e iniciales se muestra que en el caso de la normalidad 12 (concentración masa baja) ha habido un aumento general en el % de Cox, esto indica que ha aumentado el contenido del carbono más lábil y degradable durante el proceso, debido a la estimulación de la microbiota que mineraliza el carbono orgánico del suelo. Este proceso de degradación y mineralización también genera un descenso, entre los datos iniciales y finales, en el contenido de carbono resistente a la degradación (Cox 24N) que es notable en los suelos con los tratamientos orgánicos POM2, PO y CP2.

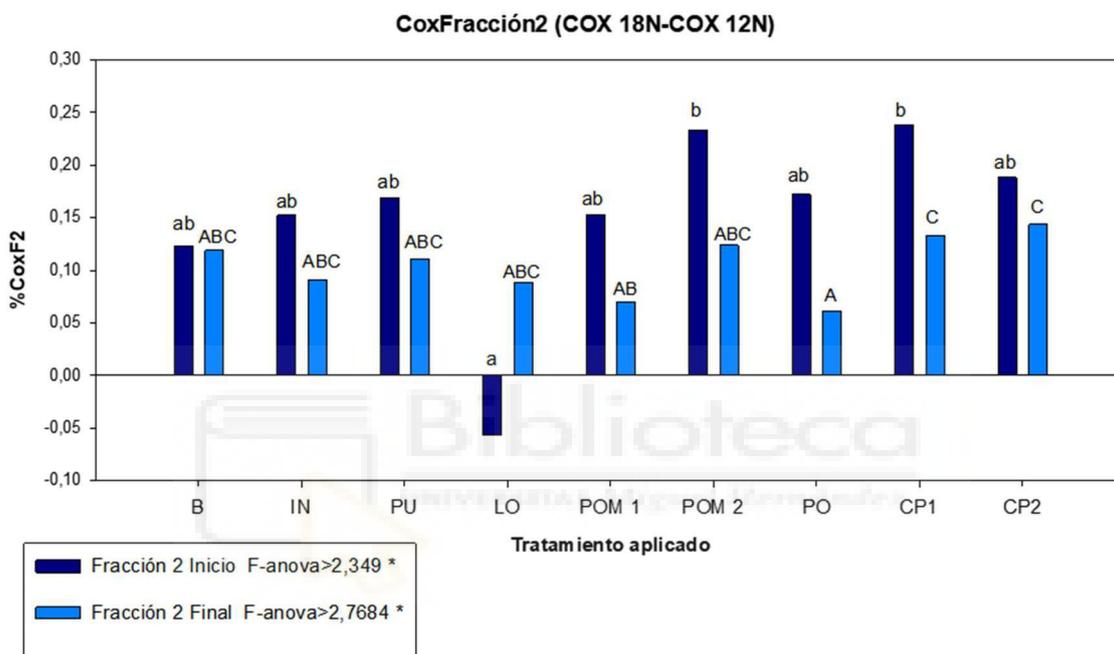


Figura 15. % de Cox de la fracción 2(Cox 18N-Cox 12N) con respecto a los distintos tratamientos aplicados al suelo. Las letras encima de las barras de los datos indican el grupo según prueba pos-hoc Tukey b.

En la Fig.15 que representa la fracción 2, obtenida de la diferencia de la concentración menor de ácido (12N) y la concentración intermedia (18N), se puede observar que de los datos iniciales destacan los valores de los suelos a los que se les aplico los tratamientos POM2 y del CP1, con esto se deduce que el uso de enmiendas orgánicas estabilizadas como son los compost y tratamientos orgánicos incrementan de forma notable el porcentaje de materia orgánica del suelo (Ferrerias et al, 2006; Hati et al, 2006) y presentan mayor contenido de carbono más estable y por lo tanto menos degradable.

En el caso del lodo se puede deducir de los datos iniciales que la cantidad de Cox perteneciente a la fracción 1 (12N) es elevada, esto es debido, como se mencionó anteriormente, a el mayor contenido en compuestos orgánicos lábiles del lodo si lo comparamos con los demás tratamientos orgánicos, esto es así por la falta de madurez y estabilización. Esto pudo ser responsable de que la mayor emisión de CO₂ la genere el suelo con LO, como se verá más adelante.

Si se comparan los datos iniciales y finales se observa un descenso general en el porcentaje de Cox, este hecho indica una disminución del contenido del C estable en el suelo y un aumento de C más lábil, debido a los procesos de degradación y biodegradación que tienen lugar en el suelo. Es importante mencionar que hallazgos anteriores respaldan que la estabilidad de los macroagregados y la disponibilidad de nitrógeno dependen de formas lábiles de carbono (Tisdall y Oades, 1982; Janzen, 1987) compuestas en gran parte por materia orgánica joven en descomposición.

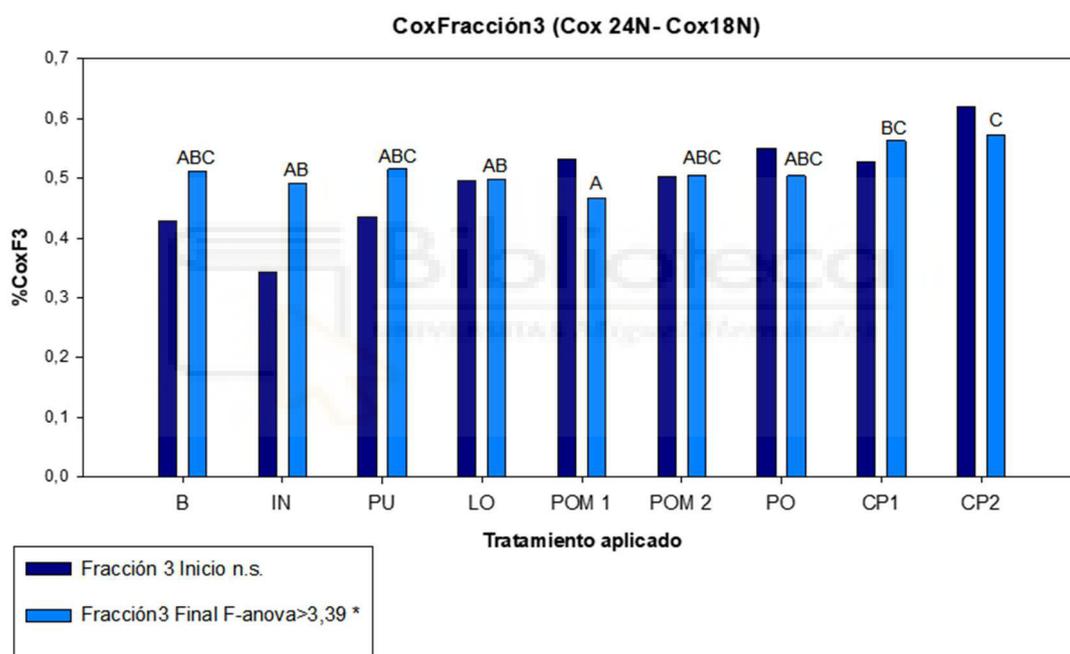


Figura 16. % de Cox de la fracción 3 (Cox 24N-Cox 18N) con respecto a los distintos tratamientos aplicados al suelo. Las letras encima de las barras de los datos indican el grupo según prueba pos-hoc Tukey b.

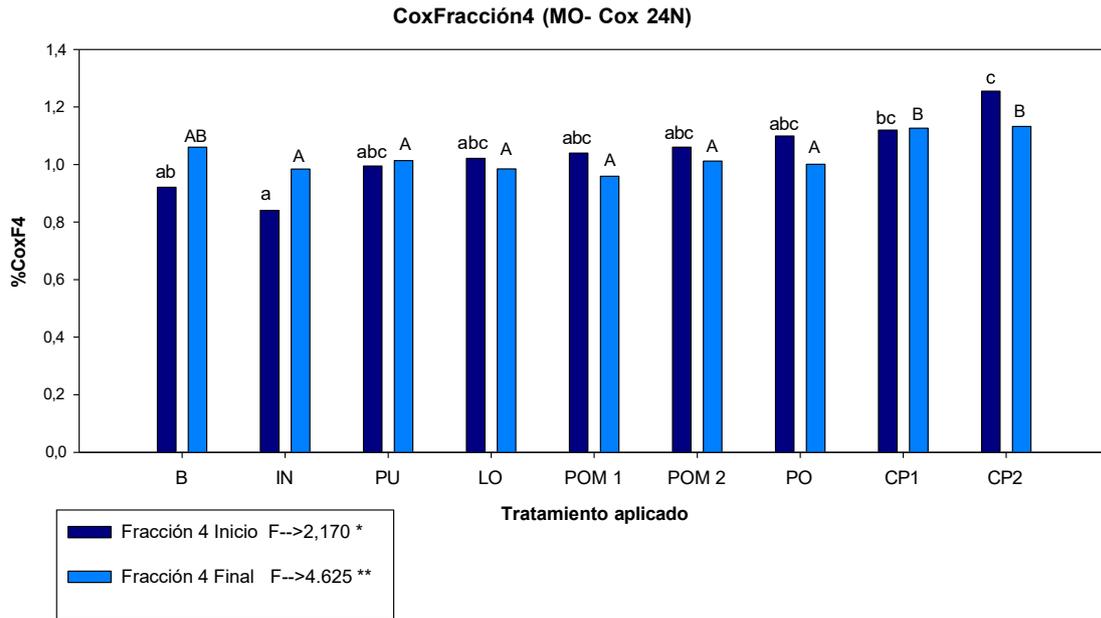


Figura 17. % de Cox de la fracción 4 (MO-Cox 24N) con respecto a los distintos tratamientos aplicados al suelo. Las letras encima de las barras de los datos indican el grupo según prueba pos-hoc Tukey b.

Observando las Fig.16 y 17 se pueden destacar varios detalles, uno de ellos es que el suelo control, al que no se le añadió ningún tipo de fertilizante, presenta un incremento en el % de Cox en las fracciones 2 y 4, esto se puede deber a que en la toma de muestras de suelo se llevó también cierta cantidad de materia vegetal incluyendo raíces, que conlleva cierto aporte de carbono, este hecho también es visible en los datos de la Tabla 5. Cabe mencionar también que se han hecho otros trabajos (Chan, 2001; Orden et al.,2011) en el que se ha utilizado el fraccionamiento químico de la materia orgánica utilizando el método de Walkley & Black estándar para la determinación del CO fácilmente oxidable por combustión húmeda, obteniéndose resultados similares.

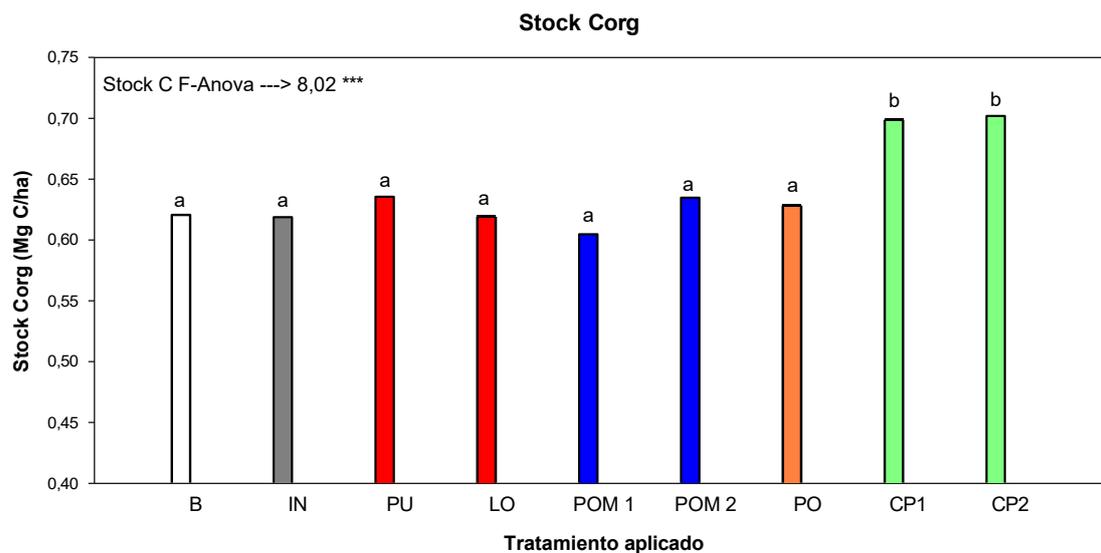


Figura 18. Reservas o stock de carbono orgánico de las muestras finales de suelo según el tratamiento aplicado. Las letras encima de las barras de los datos indican el grupo según prueba pos-hoc Tukey b.

Lo que se puede observar en la Fig.18 en los datos de stock acumulados del suelo es que hay dos tratamientos que son más elevados con respecto a el suelo en el que no se le aplico ningún fertilizante, estos datos corresponden con los suelos a los que se aplicaron los dos compost (CP1 y CP2). Esto indica que la aplicación de los compost permite aportar más cantidad de carbono orgánico en el suelo que los demás tratamientos, y además que estos niveles de C se mantienen en el tiempo, ya que la degradación y liberación de elementos más recalcitrantes ocurre de forma progresiva. Además de esto, se sabe que los compost también ayudan a mantener fertilidad física y biológica del suelo (Castejón del Pino,2018).

Por otro lado, se puede observar que no existen diferencias significativas entre el suelo control y los suelos a los que se les aplico fertilizantes inorgánicos y orgánicos frescos, y tampoco con los tratamientos órgano-órgano y órgano-mineral.

4.2. Emisiones de gases (GEI)

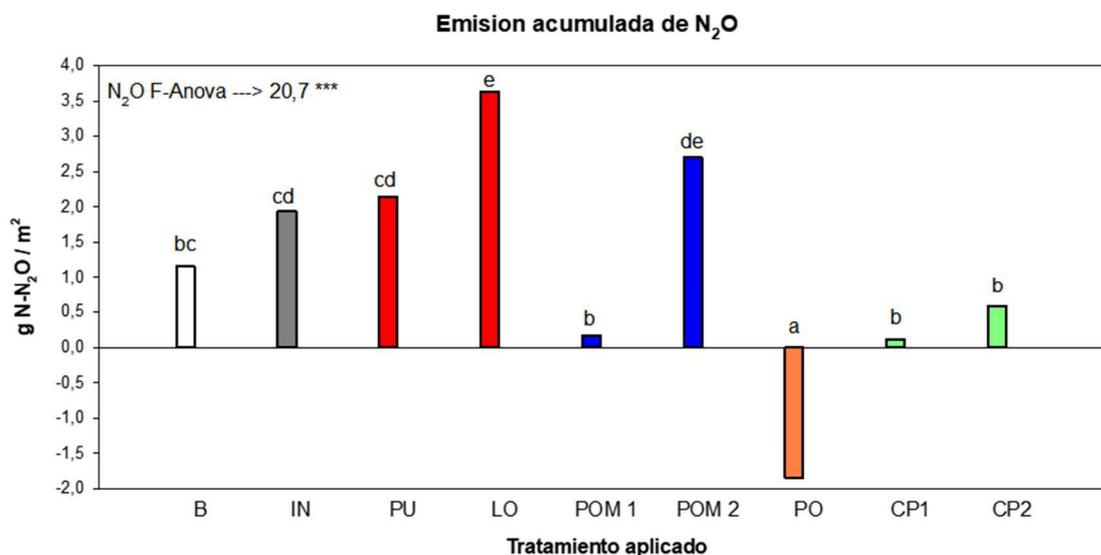


Figura 19. Emisiones acumuladas de N₂O por tratamiento aplicado al suelo. Las letras encima de las barras de los datos indican el grupo según prueba pos-hoc Tukey b.

Los datos de las emisiones acumuladas de N₂O a lo largo del proyecto, visibles en la Fig.19, muestran que la mayor emisión la generaron los tratamientos de lodo, junto con el tratamiento con purines. Que el lodo, sea el mayor emisor de este gas se puede deber a que presenta mucho contenido de nitrógeno de forma amoniacal, lo cual da idea de que la emisión de N₂O estuvo principalmente asociada a procesos de nitrificación que llevan a cabo bacterias nitrificantes (Castejón del Pino, 2018). Por otro lado, otro dato destacable fue el del tratamiento PO ya que supuso un sumidero de este gas y con ello es posible que se pueda balancear sus emisiones.

Generar sumidero de este gas o reducir su emisión es muy importante, ya que la emisión de N a la atmósfera en forma de N₂O actúa como un potente GEI con un potencial de calentamiento global (GWP) 298 veces mayor que el CO₂ además cabe destacar su implicación en el agotamiento de la capa de O₃ (Plaza-Bonilla et al, 2014).

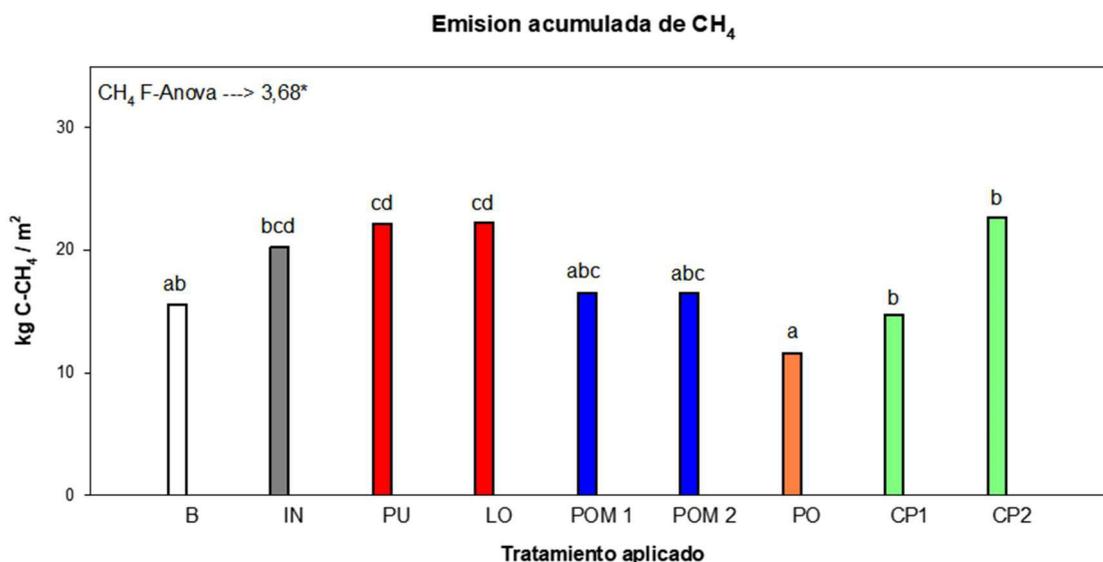


Figura 20. Emisiones acumuladas de CH₄ por tratamiento aplicado al suelo. Las letras encima de las barras de los datos indican el grupo según prueba pos-hoc Tukey b.

En el caso de las emisiones de CH₄ se puede observar en la Fig.20 que las mayores emisiones de metano las produjeron los fertilizantes orgánicos frescos, debido a que la materia orgánica del lodo y del purín es parcialmente mineralizada por microorganismos que mediante descomposición anaeróbica se generan CH₄ (Olsson, 2014). En otros trabajos se observado efectos sumidero de CH₄, que se generan debido a la creación de las condiciones necesarias para que se produzcan procesos de metanotrofia, donde en condiciones aerobias el metano es convertido en CO₂ por la actividad enzimática de bacterias metanotróficas aerobias que usan el metano como fuente de C y energía para su crecimiento (Dedysh y Dunfield, 2011).

Es importante tener en cuenta que las emisiones de metano provenientes del sector rural-agrario son de gran relevancia para el calentamiento global; ya que el CH₄ tiene un poder de calentamiento atmosférico 23 veces superior al CO₂ (Castejón del Pino, 2018).

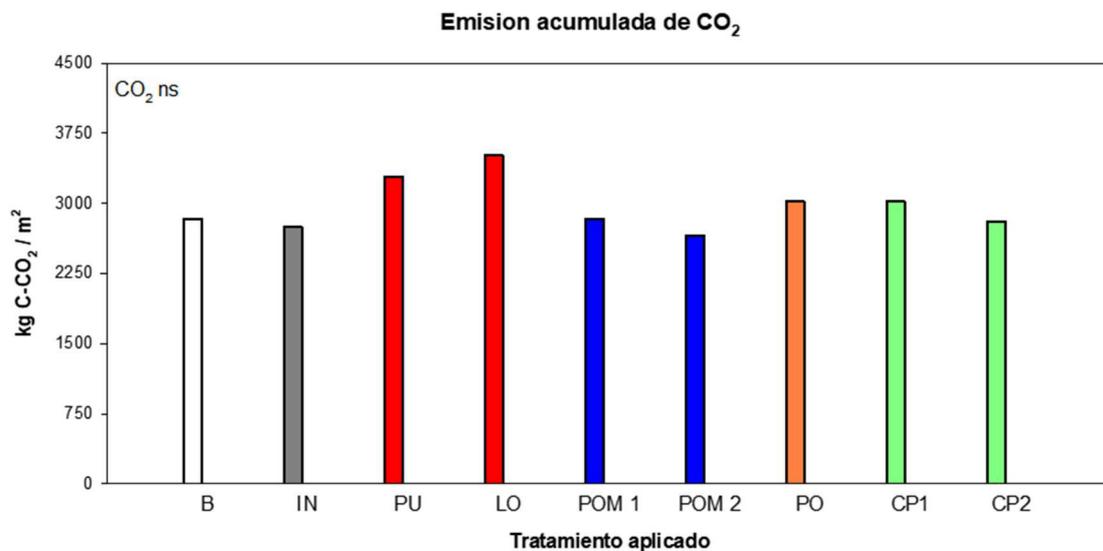


Figura 21. Emisiones acumuladas de CO₂ por tratamiento aplicado al suelo.

Lo que se puede comentar sobre las emisiones de CO₂ de la Fig.21 producidas a lo largo del proceso, es que los suelos a los que se aplicaron fertilizantes orgánico-frescos son los que más emisiones de este gas generaron, sobre todo el suelo con tratamiento con purín, estos se pueden deber a la gran cantidad de compuestos orgánicos lábiles que presentan (Castejón del Pino, 2018) si lo comparamos con el resto de los tratamientos. Además, también es importante tener en cuenta la gran cantidad que se aplicó de estos compuestos y que la aplicación se hizo de una sola vez al inicio en la fase de siembra lo que supuso una emisión mucho mayor.

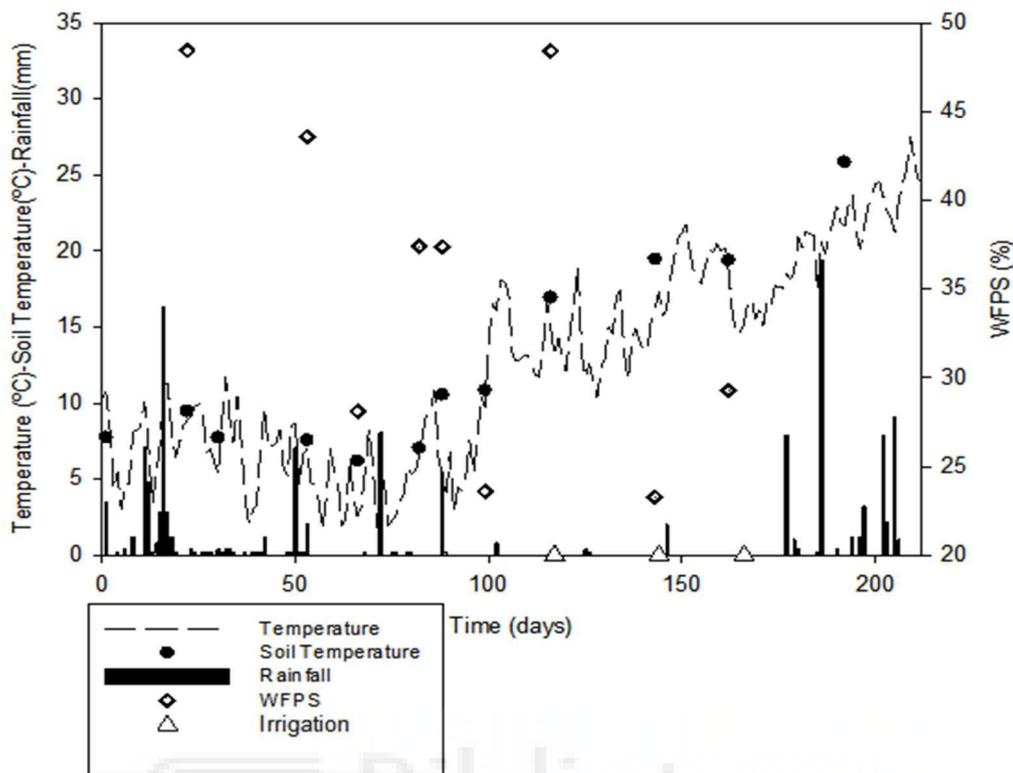


Figura 22. Lluvia, temperatura, temperatura del suelo y espacio poroso lleno de agua (WFPS) e irrigación durante el experimento

La evolución del parámetro de WFPS a lo largo del periodo desde la siembra hasta la cosecha del trigo se puede observar en la Fig.22, en esta grafica lo que se puede concluir es que el WFPS empieza con un valor alto y conforme pasan los días esos valores van fluctuando, ascendiendo y descendiendo con picos y caídas periódicas. Estas fluctuaciones están causadas por periodos de lluvia importantes al inicio del proyecto y por los 3 riegos realizados. Si nos fijamos en la temperatura del suelo y la temperatura del aire, lo que se aprecia claramente es un ascenso general de las temperaturas que se debe a la aproximación del periodo estival. Los valores obtenidos en este trabajo no muestran valores significativos de WFPS ya que según muchos estudios de campo sugieren que es más probable que se produzcan flujos significativos de N_2O en el suelo cuando el espacio poroso lleno de agua (WFPS) excede el 60% (Abbasi y Adams, 2000 ; Dobbie y Smith, 2003 ; Kessavalou et al., 1998 ; Qian et al., 1997 ; Sehy et al., 2003 ; Simojoki y Jaakkola, 2000).

4.2.1. Calentamiento global equivalente

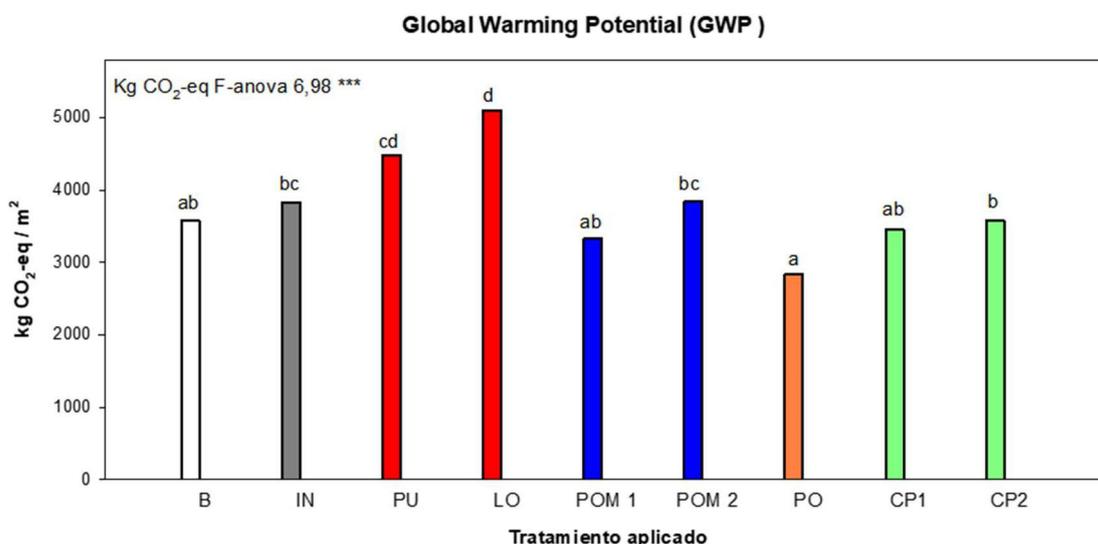


Figura 23. Potencial de calentamiento global generado por cada tratamiento. Las letras encima de las barras de los datos indican el grupo según prueba pos-hoc Tukey b.

Lo que se puede observar claramente en la Fig. 23 es que los tratamientos aplicados al suelo que más calentamiento global equivalente produjeron fueron los residuos frescos que engloban a los lodos y los purines, si se observan las gráficas de las emisiones GEI se puede apreciar que estos tratamientos fueron los que generaron más emisiones de GEI.

4.3. Rendimiento de las plantas de trigo

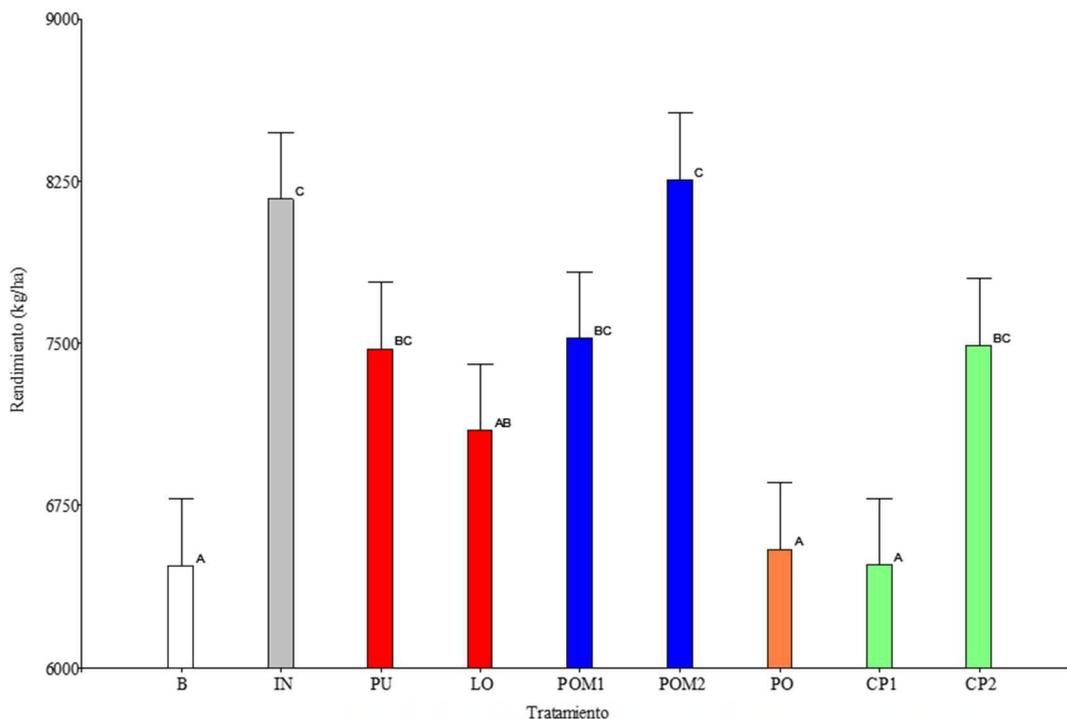


Figura 24. Rendimiento de las plantas de trigo según el tratamiento aplicado. Las letras encima de las barras de los datos indican el grupo según prueba post-hoc Tukey b.

En cuanto al rendimiento de las plantas de trigo se puede observar en la Fig.24 que el mayor rendimiento de la planta se genera cuando se aplica el tratamiento orgánico-mineral POM 2, además también cabe destacar que el tratamiento con fertilizante inorgánico también consigue unos resultados de rendimiento de trigo alto. El fertilizante inorgánico presenta un valor más alto de rendimiento ya que contienen compuestos inorgánicos que son asimilados y aprovechados por la planta de forma inmediata, no como en el caso de los compuestos estabilizados y orgánicos de los tratamientos (CP1 y PO) que necesitan su transformación a formas asimilables que se van liberando de forma paulatina.

En otro trabajo (Castejón del Pino, 2018) en el que se aplicaron diferentes bloques fertilizantes (fertilizantes orgánicos estabilizados, fertilizantes orgánicos frescos y fertilizantes inorgánicos) en un cultivo de eneldo, se obtuvo que los tratamientos orgánicos bioestabilizados tuvieron una producción equiparable a los tratamientos inorgánicos. En este trabajo también se vio que los tratamientos con peor rendimiento productivo fueron el estiércol y el cultivado sin fertilización (control). La exigua producción del tratamiento con estiércol vacuno pudo ser debida a un desequilibrio en su contenido NPK con respecto a las necesidades nutricionales del eneldo, a la propia naturaleza del tratamiento o un posible efecto fitotóxico sobre la germinación de las semillas de eneldo.

5. Conclusiones

A través de los resultados obtenidos se pueden sacar varias conclusiones sobre el impacto ambiental que tienen los diferentes biofertilizantes utilizados en comparación con el uso de fertilizantes correspondientes con el manejo convencional del cultivo de trigo. Esto se evaluó principalmente a través de la evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero y la determinación del secuestro edáfico de C. Las conclusiones a las que se llegaron fueron:

La aplicación de tratamientos orgánicos estabilizados como los compost (CP1 Y CP2) y otros tratamientos orgánicos (PO y POM2) aumentaron el contenido de materia orgánica resistente a la degradación (Cox 24N) y con ello permiten mantener el stock de C del suelo.

Los suelos con tratamientos con residuos fresco (PU y LO) generaron grandes cantidades de GEI a la atmósfera, siendo estos los que más N_2O , CO_2 y CH_4 emitieron en comparación a los suelos con demás tratamientos. Además, estos residuos frescos son los que más calentamiento global equivalente generaron.

El mayor rendimiento lo generan los fertilizantes órgano-minerales y los inorgánicos y los biofertilizantes no destacaron demasiado.

Sabiendo esto ahora cabe plantearse si el uso de los residuos frescos son recomendables para este tipo de cultivo, ya que, como se ha visto generan grandes cantidades de GEI a la atmósfera, lo que genera un impacto ambiental negativo acentuando el calentamiento global, además de que el rendimiento generado por estos tratamientos en las plantas de trigo no es muy destacable.

Por otro lado, los suelos a los que se les aplicaron residuos orgánicos no presentan grandes emisiones de GEI, de hecho, algunos de estos suelos actúan como sumideros de estos gases como el N_2O . Y además estos tratamientos aumentaron el stock de C del suelo hecho muy importante debido a la disminución de este contenido que está ocurriendo en el mundo.

Es por ello que deberían mantenerse las prácticas agrícolas que permitan mantener y mejorar el contenido de materia orgánica para de este modo poder conseguir una buena producción agrícola y una buena calidad ambiental.

En definitiva, se han llegado a estas conclusiones con este tipo de cultivos y en esta zona concreta de España, es necesario que se siga investigando sobre la aplicación de estos biofertilizantes frente a los convencionales, en otros tipos de cultivos y en otras zonas del mundo para poder llegar a un conocimiento más global y completo.

6. Bibliografía

- Abbasi, M.K., and Adams, W.A., 2000. Gaseous N emission during simultaneous nitrification-denitrification associated with mineral N fertilization to a grassland soil under field conditions. *Soil Biol. Biochem.*, 32, 1251–1259.
- Agrocompmost, UMH, 2023. <https://agrocompostaje.umh.es/2021/02/24/la-economia-circular-del-campo/.29/03/2023>
- Arbuckle, J. G., Morton, L. W., & Hobbs, J., 2015. Understanding Farmer Perspectives on Climate Change Adaptation and Mitigation: The Roles of Trust in Sources of Climate Information, Climate Change Beliefs, and Perceived Risk. *Environment and Behavior* 47(2), 205–234.
- Bernal, M. P., Sommer S. G., Chadwick, D., Qing, C., Guoxue, L., Michel Jr., F. C., 2017. Current Approaches and Future Trends in Compost Quality Criteria for Agronomic, Environmental, and Human Health Benefits. In: Donald L. Sparks, Estudio comparativo de diferentes escenarios de fertilización en cultivo de eneldo: implicaciones a nivel agronómico y medioambiental 6. Bibliografía 108 editor, *Advances in Agronomy*, 144, Burlington: Academic Press, 2017, 143-233.
- Blandford, D., Hassapoyannes, K., 2018. The Role of Agriculture in Global GHG Mitigation. *OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers*, No. 112. Paris: OECD Publishing.
- Bremner, J.M., Britebeck, G.A., 1983. A simple method for determination of ammonium in semimicro-Kjeldahl analysis of soils and plant materials using a block digester. *Commun. Soil Sci.*, 14, 905-913.
- Castejon del Pino, R., 2018. Estudio comparativo de diferentes escenarios de fertilización en cultivo de eneldo: implicaciones a nivel agronómico y medioambiental. Trabajo final de grado. UMH.
- Chan K, Bowman A, Oates A. 2001. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an Oxic Paleustalf under different pasture leys. *Soil Sci.* 166(1):61-67.
- Chittora, D., Meena, M., Barupal, T., Swapnil, P., Sharma, K., 2020. Cyanobacteria as a source of biofertilizers for sustainable agriculture. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 22.

- Coumou, D., Rahmstorf S, 2012. Una década de climas extremos. *Naturaleza Cambio Climático* , 2, 491-496.
- Dedysh, S., and Dunfield, P., 2011. Chapter three - Facultative and obligate methanotrophs: how to identify and differentiate Them. *Methods in enzymology*,495,31-44.
- Deeks,L.K.,Chaney,K.,Murray,C.,Sakrabani,R.,Gedara,S.,Le,M.S.,Tyrrel,S.,Pawlett,M.,Leer,R.,Smith,G., 2013. A new sludge-derived organo-mineral fertilizer gives similar crop yields as conventional fertilizers.*Agronomy for Sustainable Development*,33,539-549.
- Dobbie, K.E., and Smith, K.A.,2003. Impact of different forms of N fertilizer on N₂O emissions from intensive grassland. *Nutr. Cycling Agroecosyst*,67,37–46.
- España. Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular. [Internet] Boletín Oficial del Estado, núm. 85, de 09/04/2022 [consulta: 8 marzo 2023]. Disponible: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-5809>
- European environmental agency, 2022. Greenhouse gas emissions from agriculture in Europe.Recuperado de: [https://www.eea.europa.eu/ims/greenhouse-gas-emissions-from-agriculture\[2023\]](https://www.eea.europa.eu/ims/greenhouse-gas-emissions-from-agriculture[2023])
- Fakhrul Islam, S.M.,Karim, Z., 2019. Sustainable Agricultural Management Practices and Enterprise Development for Coping with Global Climate Change. *Sustainable Management Practices*.
- Ferrari, J.; Orden, L., Dagna, N., Andreu Rodríguez, J.; Moral R. The effects of organic-mineral fertilizer application of barley crop in SW Buenos Aires (Argentina). 2022. *Revista de Ciências Agrárias*, 45(Especial 1): 1-5.
- Ferreras, L., Gomez, E., Toresani, S., Firpo, I., Rotondo, R., 2006. Effect of organic amendments on some physical, chemical and biological properties in a horticultural soil. *Bioresource Technology*,97,635-640.
- Grupo de Trabajo de Declaración de Posición sobre el Cambio Climático,2011. Declaración de posición sobre el cambio climático. Madison, WI: Representante del grupo de trabajo ASA, CSSA y SSSA.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático,2007. Cambio climático 2007: Mitigación. Contribución del Grupo de Trabajo III al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R., Meyer, L.A., Eds.). Cambridge, Reino Unido; Nueva York, NY: Cambridge University Press.
- Hao,X.,Ball, B.C.,Culley,J.L.B.,Carter,M.R.,2019. Soil Density and Porosity. Chapter 57.
- Hatfield, J. L., Ort, D., Thomson, A. M., Wolfe, D., Izaurralde, R. C, Kimball, B., Boote, K.J., Ziska, L.H.,2011. Impactos climáticos en la agricultura: Implicaciones para la producción de cultivos. *Diario de Agronomía* , 103, 351-370.

- Hati, K.M., Swarup, A., Singh, D., Misra, A.K., Ghosh, P.K., 2006. Long-term continuous cropping, fertilisation, and manuring effects on physical properties and organic carbon content of a sandy loam soil. *Australian Journal of Soil Research*,44,487- 495
- Howden, S. M., Soussana, J.-F., Tubiello, F. N., Chhetri,N., Dunlop, M., Meinke, H.,2007. Adaptar la agricultura al cambio climático. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias* , 104, 19691-19696.
- Hui,J.U.,Er-da,L.,Wheeler,T.,Challinor,A.,Shuai,J., 2013. Climate Change Modelling and Its Roles to Chinese Crops Yield.*Journal of Integrative Agriculture*,12,892-902.
- IPCC, 2014. "Climate change 2014: synthesis report," in *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. eds Core Writing Team, R. K. Pachauri, and L. A. Meyer(Geneva: IPCC).
- Janzen, H.H ,1987. Características de la materia orgánica del suelo después de un cultivo a largo plazo en varias rotaciones de trigo en cadena. *Poder. J. Ciencia del suelo*,67,845-856.
- Kessavalou, A., Doran, J.W., Mosier, A.R., and Drijber, R.A., 1998. Greenhouse gas fluxes following tillage and wetting in a wheat-fallow cropping system. *J. Environ. Qual*,27,1105–1116.
- Klein, R . J .T., Huq, S., Denton, F., Downing, T.E., Richels, R.G., Robinson, J.B., Toth, F.L., 2007. Interrelaciones entre adaptación y mitigación. En Parry ,M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E.(Eds.).*Cambio climático 2007: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del grupo de trabajo II al cuarto informe de evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático* ,745-777. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- Kristensen K, Schelde K, Olesen J E., 2011. Winter wheat yield response to climate variability in Denmark. *Journal of Agricultural Science*, 149, 33-47.
- McCarl, B. A., 2010. Análisis de las implicaciones del cambio climático para la agricultura y la silvicultura: un esfuerzo interdisciplinario. *Cambio Climático*, 100, 119-124.
- Menendez,S.,Merino,P.,Pinto,M.,Gonzalez-Murua,C.,Estavillo,J.M., 2006.3,4-Dimethylpyrazol Phosphate Effect on Nitrous Oxide,Nitric Oxide,Amonia and Carbon Dioxide Emission from Grasslands.*Journal of Enviromental Quality*.
- Mielcarek, P., Rzeznik, W., 2018. Greenhause gas emission from polish agriculture in years 2007-2016.*Engineering for rural development*(pp.1754-1759).
- Mikhailova,N., 2018. El uso equilibrado de fertilizante gracias a las técnicas nucleares contribuye a aumentar la productividad y a proteger el medio ambiente.*Boletin oficial del OIEA*.

- Moreno,J.,Perez,A., 2020.Efecto de la materia orgánica sobre las propiedades fisicoquímicas y químicas del suelo. Departamento de agroquímica y medio ambiente. Universidad Miguel Hernández.
- Olsen, S., Cole, C., Watanabe, F., Dean, L., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. In USDA Circular Nr 939. US Gov. Print. Office: Washington, DC, USA.
- Olsson,L.,Dam Larse,J.,Ye,S.,Brix,H., 2014. Emissions of CO₂ and CH₄ from sludge treatment reed beds depend on system management and sludge loading. Journal of Environmental Management,141,51-60.
- Orden,L.,Mandolesi,M.E.,Kiessling,R.J.,Ron,M.M., 2011. Variabilidad espacial de fertilidad química del suelo en un diseño de bloques.Spanish Journal of Soil Science(SJSS),1.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Portal de suelos de la FAO. Recuperado de: [https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/secuestro-de-carbono-en-el-suelo/es/\[2023\]](https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/secuestro-de-carbono-en-el-suelo/es/[2023])
- Pacto Verde Europeo. Consejo Europeo. Consejo de la Unión Europea ,2022 .Recuperado de : <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/#:~:text=Cronolog%C3%ADa%20completa,%C2%BFQu%C3%A9%20es%20el%20Pacto%20Verde%20Europeo%3F,clim%C3%A1tica%20de%20aqu%C3%AD%20a%202050>.
- Pacto Verde Europeo. Consejo Europeo. Consejo de la Unión Europea, 2022.. Recuperado de : <https://www.consilium.europa.eu/es/press/press-releases/2020/12/17/council-approves-conclusions-on-making-the-recovery-circular-and-green/>.
- Parlamento Europeo,2015. Economía circular: definición, importancia y beneficios. Recuperado de: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/2015120STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios#:~:text=La%20econom%C3%ADa%20circular%20es%20un,%20de%20los%20productos%20se%20extiende>.
- Parr, J. F.,Sullivan, L. A., 2005.Soil carbon sequestration in phytoliths. Soil Biology and Biochemistry,37,117-124.
- Parry,M.,Rosenzweig,C.,Livermore,M., 2005. Climate change, global food supply and risk of hunger. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Science,360,2125-2138.
- Pirttilä,A.M.,Parast,H.M.,Baruah,N.,Koskimäki,J.J., 2021.Biofertilizers and Biocontrol Agents for Agriculture: How to Identify and Develop New Potent Microbial Strains and Traits.Microorganism,9.
- Plaza-Bonilla, D., Álvaro-Fuentes, J., Arrue,J.L., Cantero-Martinez,C., 2014. Tillage and nitrogen fertilization effects on nitrous oxide yield-scaled emissions in a rainfed Mediterranean área. Agriculture, Ecosystems & Environment,189,43-52.

- Plaza-Bonilla, D., Álvaro-Fuentes, J., Bareche, J., Masgoret, A., Cantero-Martínez, C., 2017. Delayed Sowing Improved Barley Yield in a No-Till Rainfed Mediterranean Agroecosystem. *Agronomy Journal* , 109, 1249–1260. doi:10.2134/agronj2016.09.0537.
- Plaza-Bonilla, D., Arrue, J.L., Cantero-Martínez, C., Fanlo, R., Iglesias, A., Alvaro-Fuentes, J., 2015. Carbon management in dryland agricultural systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 1319-1334.
- Qian, J.H., Doran, J.W., Weier, K.L., Mosier, A.R., Peterson, T.A., and Power, J.F., 1997. Soil denitrification and nitrous oxide losses under corn irrigated with high-nitrate groundwater. *J. Environ. Qual.*, 26, 348–360.
- Ryosuke, K., Chiho, S., Kaho, Y., Arata, N., Yiran, Y., Jing, D., Norikazu, Y., Katsuro, T., Masahito, K., Ryusuke, H., 2021. Effects of Three Types of Organic Fertilizers on Greenhouse Gas Emissions in a Grassland on Andosol in Southern Hokkaido, Japan. *Frontiers in Sustainable Food Systems*
- Sanz-Cobena A, Lassaletta L, Aguilera E, del Prado A, Garnier J, Billen G et al., 2017. Strategies for greenhouse gas emissions mitigation in Mediterranean agriculture: a review. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 238, 5-24.
- Schlesinger, W. H., 1990. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature*, 348, 232-234. School of Environmental Science and Management, Southern Cross University, Lismore, NSW 2480, Australia
- Schlesinger, W. H., Jeffrey, A. A., 2000. Soil respiration and the global carbon cycle. *Entomol. Exp. Appl.* 103, 239–248. doi: 10.1023/A.
- Sehy, U., Ruser, R., and Munch, J.C., 2003. Nitrous oxide fluxes from maize fields: Relationship to yield, site-specific fertilization, and soil conditions. *Agric. Ecosyst. Environ.* , 99, 97–111.
- Simojoki, A., and Jaakkola, A., 2000. Effect of nitrogen fertilization, cropping and irrigation on soil air composition and nitrous oxide emission in a loamy clay. *Eur. J. Soil Sci.*, 51, 413–424.
- Smith, J.L., Doran, J.W., 1996. Measurement and use of pH and electrical conductivity for soil quality analysis. In: Doran, J.W., Jones, A.J. (Eds.), *Methods for Assessing Soil Quality*, Soil Sci. Soc. Am. Special Publication 49. SSSA, Madison, WI.
- Tisdall, J.M., Oades, J.M., 1982. Materia orgánica y agregados hidroestables en suelos. *J. Ciencia del suelo*, 33, 141-63.
- UNEP, 2019. Emissions Gap Report, 2019. Nairobi: United Nations Environment Programme (UNEP).
- United States Department of Agriculture (USDA), Natural Resources Conservation Service (NRCS). Bulk Density/Moisture/Aeration. Soil Quality Kit-Guides for Educators.

Valera Martinez-Santos,F.(2014).Agricultura tradicional en Campo de Criptana tercera parte:El cultivo y recolección del trigo.Recuperado de: [file:///C:/Users/migut/Downloads/Agricultura tradicional 3%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/migut/Downloads/Agricultura%20tradicional%20(1).pdf)[2023]

Villalva,S.,Fuentes-Pila,J., 1994.Agricultura sostenible. Ministerio de agricultura pesca y alimentación. Hojas divulgadoras,7/93, 3-6.

Walkley, A. and Black, I.A., 1934. An Examination of the Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. Soil Science, 37, 29-38.

Zadoks,J.C.,Chang,T.T. and C.F., 1974.A decimal code for the growth stages of cereals.Weed Research,14,415-421.

Zajonc,O.,Frydrych,J.,Jezerska,L., 2014. Pelletization of Compost for Energy Utilization. International Conference on Agricultural and Biosystem Engineering.

7. Anexos

Tabla 1. Planificación del proyecto

Días desde la siembra del trigo	Etapas de crecimiento de la escala de Zadoks	Tareas realizadas
Día 0		Siembra de trigo
Día 10	Germinación	Aplicación de fertilizante rico en P, medición de gases y muestreo de suelo
Día 17	Crecimiento de Plántula	Medición de gases
Día 31		Medición de gases
Día 39		Medición de gases
Día 59		Medición de gases
Día 74		Medición de gases
Día 75		Medición de gases
Día 90	Ahijamiento	Aplicación de fertilizantes ricos en N y medición de gases
Día 97	Elongación del Tallo	Medición de gases
Día 107		Medición de gases
Día 124	Emergencia de la Inflorescencia	Medición de gases
Día 155	Desarrollo del grano	Medición de gases
Día 171		Medición de gases
Día 199	Madurez	Cosecha, medición de gases y muestreo de suelo