



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Facultad de Ciencias Experimentales

Trabajo Fin de Grado

**Efectos del biochar,
bokashi y compost en
las dinámicas del
carbono y nitrógeno en
suelos con pH
contrastados**

Alumno: Juan López Molina

Julio, 2018



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Facultad de Ciencias Experimentales



Trabajo Fin de Grado

EFECTOS DEL BIOCHAR, BOKASHI Y COMPOST EN LAS DINÁMICAS DEL CARBONO Y NITRÓGENO EN SUELOS CON PH CONTRASTADOS

Alumno: Juan López Molina

Fdo:

Julio, 2018

ÍNDICE

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Situación actual de las áreas de estudio	2
1.1.1. Burundi, un país pobre y con escasez de recursos	2
1.1.2. Jaén, provincia olivarera.....	4
1.1.3. Razones de la elaboración del TFG	6
1.2. Suelos de ambas regiones estudiadas	7
1.2.1 Suelos de Burundi	7
1.2.2 Suelos de la provincia de Jaén.....	9
1.3. Uso de las enmiendas orgánicas para mejorar las condiciones del suelo agrícola.....	10
1.4. Importancia de la agricultura de conservación en la disminución de las emisiones de CO ₂ y su influencia en el cambio climático	12
2. HIPÓTESIS DE TRABAJO Y OBJETIVOS.....	13
3. MATERIAL Y MÉTODOS	13
3.1. Recogida de muestras.....	13
3.2. Pretratamientos del suelo	14
3.3. Test de fitotoxicidad.....	14
3.4. Preparación de las enmiendas orgánicas.....	15
3.5. Análisis de los suelos y de las enmiendas orgánicas	17
3.6. Diseño experimental	19
3.7. Análisis estadístico de los resultados	23
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
4.1. Caracterización inicial de la calidad de los suelos y de las enmiendas	24
4.2. Respiración de los suelos como resultado de la mineralización de carbono procedente de los diferentes aportes de materia orgánica.....	26
4.3. Dinámica del nitrógeno tras la aplicación de las diferentes enmiendas.....	33
5. CONCLUSIONES	37
6. BIBLIOGRAFÍA.....	38

RESUMEN

En las últimas décadas la agricultura ha estado regida por un aumento intenso de la producción, que ha contribuido al deterioro de los suelos, favoreciendo la erosión, la pérdida de fertilidad y la liberación de carbono a la atmósfera. Una alternativa para hacer frente a este problema es la agricultura de la conservación. Este tipo de agricultura promueve el reciclaje y la reutilización de fuentes de materia orgánica locales. En este estudio, se ha evaluado la influencia que tienen diferentes tipos de enmiendas orgánicas (biochar, bokashi y compost), en la dinámica del carbono y del nitrógeno, en dos suelos con características edafoclimáticas contrastadas (un suelo de carácter básico de un Olivar y un suelo ácido procedente de Burundi). Los resultados de la mineralización de carbono revelaron que la enmienda más estable fue el biochar, lo que indica que es un material idóneo para retener carbono en el suelo a largo plazo. La producción acumulada de carbono varió en función del tipo de suelo, obteniéndose los mayores resultados para el compost en el suelo de olivar, que acumuló $963\mu\text{g C-CO}_2\text{ g}^{-1}$, frente a los 561,5 alcanzados por el bokashi en el suelo de Burundi. A excepción del bokashi, con el que se obtuvieron los mejores resultados, las enmiendas no modificaron la cantidad de nitrógeno disponible en el suelo, llegando a producirse incluso inmovilización para el compost en el suelo de Burundi. Al igual que para la dinámica del carbono, los niveles de liberación de nitrógeno fueron mayores para el suelo de Olivar.

Palabras clave: Agricultura de la conservación, Burundi, Olivar, mineralización de C, N disponible, bokashi, compost, biochar.

ABSTRACT

Until the present time, agriculture has been governed by an intense increase in production, which has contributed to the deterioration of soils, favoring erosion, the loss of fertility and the release of carbon into the atmosphere. An alternative to address this problem is conservation agriculture. This type of agriculture promotes the recycling and reuse of local organic matter sources. In this study, the influence of different types of organic matter (biochar, bokashi and compost) on the dynamics of carbon and nitrogen in two soils with different proven edaphoclimatic characteristics (Olivar basic soil and Burundi acid soil). The results of the carbon mineralization revealed that the most stable amendment was the biochar, which indicates that it is an ideal material to

retain carbon in the soil. Accumulated carbon production varied according to the type of soil, obtaining the highest results for the compost in the olive grove, which accumulated 963 μ g C-CO₂ g⁻¹, compared to 561.5 reached by the bokashi in the soil of Burundi. With the exception of the bokashi, with which the best results were obtained, the amendments did not modify the amount of nitrogen available in the soil, resulting in the immobilization of the compost in the soil of Burundi. As for carbon dynamics, nitrogen release levels were higher for olive soil.

Key words: Conservation agriculture, Burundi, Olive grove, carbon mineralization, nitrogen available, bokashi, compost, biochar.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Situación actual de las áreas de estudio

1.1.1 Burundi, un país pobre y con escasez de recursos

Burundi, es un pequeño país situado en África oriental que limita con Ruanda al Norte, con Tanzania, al este y al sur, con el lago Tanganica al suroeste y con la República Democrática del Congo al oeste. Cuenta con 17 provincias que cubren un área de 27.830km², entre las que se encuentra Ngozi, área que forma parte de este estudio [1]

Ngozi se encuentra en la sabana arbolada de Miombo del Zambese central. Los suelos suelen ser pobres y de carácter ácido, propios de un clima tropical. La tipología de los suelos de la zona está formada por Leptosoles, Ferrasoles y Nitosoles [2].

Se caracteriza por tener un clima árido, muy caluroso y seco, con temperaturas medias que rondan los 15-20°C. Estas condiciones generan grandes sequías y favorecen los incendios. Es común encontrar suelos erosionados y estériles en dichas áreas de incendio, debido a que las lluvias torrenciales que se dan en la temporada de lluvia, arrastran la capa vegetal húmida dejando al descubierto la roca. Las precipitaciones anuales son de 1000-1500mm (Jones *et al.*, 2013).

A este problema ambiental deben sumarse otros como la deforestación y la degradación de los suelos, entre otros.

Burundi, contaba con una población total de 10.8 millones de habitantes en 2014 que ascendió hasta los 11.9 en 2017 (Figura 1). Se estima que estas cifras seguirán aumentando con el paso de los años. Las cifras previstas para el 2020 rondaran los 13,1 millones de habitantes según datos del Banco de Desarrollo Africano [3]

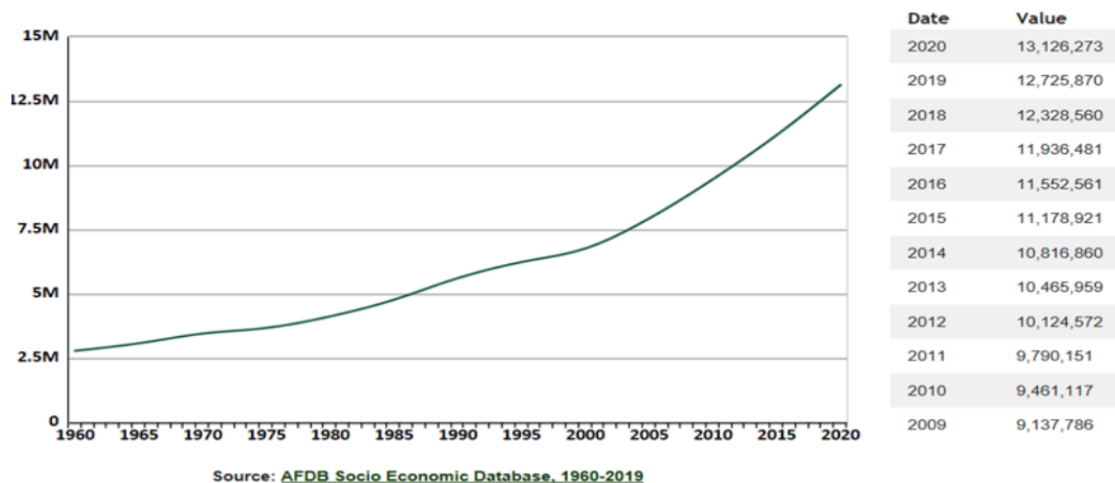


Figura 1. Población total de Burundi. Fuente: African Development Bank Group

Esta explosión demográfica, está relacionada directamente con el aumento de los problemas ambientales citados anteriormente, ya que la mayor parte de la población está dedicada a la agricultura (Alrededor del 90%), según la Agencia Central de Inteligencia [4], que es el pilar económico del país, contribuyendo con el 44% del PIB, y la actividad más realizada para que la población subsista. Entre las limitaciones que tiene el desarrollo de la agricultura en dicho país destacan: la fertilidad de los suelos, el escaso uso de insumos agrícolas, la falta de innovación tecnológica, las fluctuaciones en la producción, la presión demográfica, etc. Dichas limitaciones, hacen que Burundi sea uno de los países más pobres del mundo en la actualidad. De hecho, el informe de 2011 “Global Hunger Index” producido por el Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias (IFPRI) clasifica a Burundi en el puesto dos con el índice de hambre más deteriorado [5]

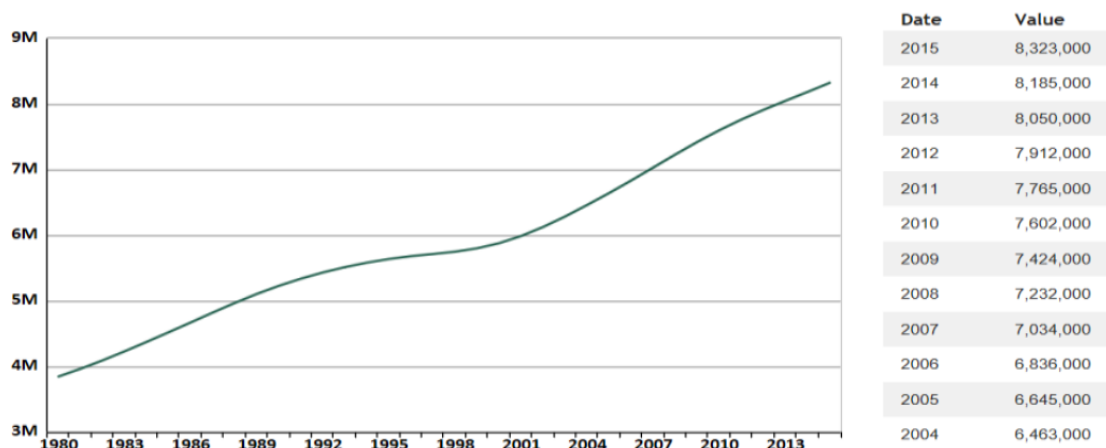


Figura 2. Población agrícola de Burundi. Fuente: African Development Bank Group

1.1.2 Jaén, provincia olivarera

Jaén es una provincia localizada en la región nororiental de la Comunidad Autónoma de Andalucía, que limita con las provincias de Córdoba, al Oeste, Ciudad Real, al Norte, Granada, al Sur, y Albacete al Este.

Figura 3: Localización de la provincia de Jaén (Área de estudio)



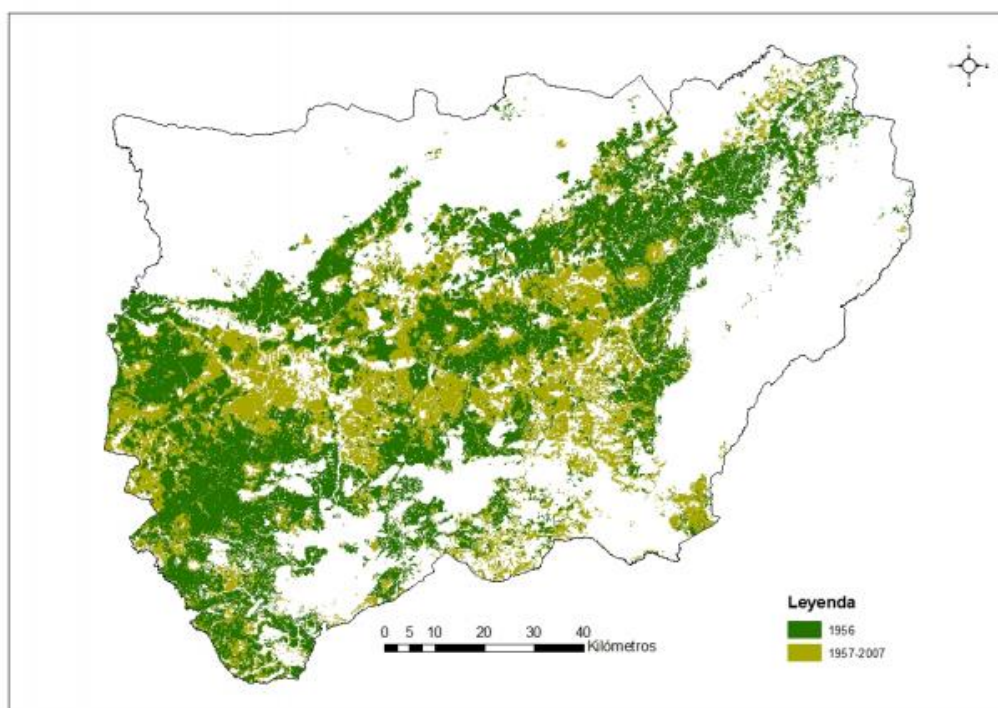
Fuente: Paniza et al, 2015

Cubre una superficie total de 13.496km² según datos recogidos por el Instituto Nacional de Estadística [6], repartidos entre 97 municipios que concentran unos 670.000 habitantes, representando solo un 8% de la población total de Andalucía.

En esta provincia pueden encontrarse diferentes cordilleras montañosas, distribuidas a lo largo del sur y el oriente provincial, entre las que destacan Sierra Morena y varias sierras de la subbética, pertenecientes a las Cordilleras Béticas. En el área central y occidental de esta región, se abre camino a través de algunas de estas cordilleras, el Valle del Guadalquivir.

La mayoría de los suelos son pobres, poco evolucionados y en muchos casos, muy degradados por la fuerte presión de la actividad agrícola (Olivar convencional fundamentalmente). Destacan los luvisoles, litosoles, regosoles, vertisoles y cambisoles. El clima está caracterizado por una etapa de larga sequía veraniega y una de lluvias, con precipitaciones medias que abarcan desde los 300 a los 600mm, aunque pueden superar los 1000mm en zonas de montaña. Las temperaturas medias oscilan entre los 10°C, en zonas de montaña, y los 18°C en la depresión del Guadalquivir.

Figura 4. Distribución total del olivar de la provincia de Jaén. Los diferentes colores indican la expansión de este cultivo desde el año 1956 hasta el 2007.



Fuente: Paniza *et al.*, 2015.

En la actualidad, Andalucía dedica al cultivo del olivar una extensión de 1,5 millones de hectáreas, que representan el 80% de la producción española y una tercera parte

del total de olivares de Europa (MARM, 2014). Jaén dedica más del 91% de su extensión agrícola a este tipo de cultivo, representando la producción de aceite de oliva, una de las principales actividades económicas de la provincia (Paniza *et al.*, 2015).

Hasta mediados del siglo XX, la mayoría de la población de Jaén se dedicaba a las labores del campo y el cultivo del olivar era de carácter extensivo. Además, el suelo dedicado a este tipo de cultivo era el menos fértil, ya que los mejores terrenos se destinaban a la producción de cereal, que era la base de la alimentación humana de la época. En contraposición, en las últimas décadas las cosechas aumentaron debido a la intensificación productiva (Uso de fertilizantes químicos, herbicidas, mayor capacidad técnica, uso de regadío, etc), hecho que está desencadenando el deterioro de los suelos, modificando sus propiedades y favoreciendo la pérdida de nutrientes y la contaminación, tanto de suelos como de las aguas. (Sánchez, 2012; Pastor, M., et al, 2001)

1.1.3 Razones de la elaboración del TFG

El siguiente trabajo está relacionado con un proyecto de mejora de la fertilidad y la calidad de los suelos a partir de recursos naturales locales en el área de Ngozi, Burundi. Este proyecto, fue financiado por la universidad de Jaén en el año 2016, en colaboración con ONGDs de la comunidad autónoma de Andalucía. Actualmente este proyecto ha sido ampliado, por lo que se sigue trabajando en la zona. En este TFG se intentarán encontrar algunas soluciones agroambientalmente sostenibles para dos áreas con diferentes condiciones climáticas, sociales y económicas.

Por un lado, nos encontramos el área sujeta al proyecto, Burundi, uno de los países más pobres del mundo. La falta de innovación tecnológica, de conocimiento de la población o de insumos agrícolas, dificultan la producción suficiente de alimentos para abastecer a una población que, según informes de la Organización de las Naciones para la Agricultura y la alimentación (FAO), tiene problemas de desnutrición crónica (7 de cada 10 hogares en Burundi tienen dificultades para tomar una comida al día, y 2 de cada 10 pasan días enteros sin comer).

Por otro lado, se realizará el estudio de un área de olivar situada en la provincia de Jaén, en el sur de España. En ella, las condiciones socioeconómicas y tecnológicas, entre otras, son totalmente diferentes. La producción agrícola en estas áreas es muy elevada lo que se traduce en un insostenible deterioro de los suelos. Los problemas principales son la erosión de los suelos debido a las malas prácticas agrícolas como el uso abusivo de herbicidas que eliminan la cubierta vegetal, de fertilizantes inorgánicos, que generan problemas de contaminación, el laboreo intensivo, etc.

Por ello, uno de los objetivos de este estudio es conseguir mejorar las condiciones nutricionales de la población de Ngozi, usando técnicas de agricultura orgánica como pilar fundamental, y enseñando a dicha población a gestionar los recursos de la zona para mejorar la producción agrícola. Por contraste, lo que se pretende conseguir en Jaén, es favorecer el uso de prácticas agrícolas más respetuosas con el medio ambiente, que mejoren la calidad de los suelos y la retención de carbono, y que ayuden a reducir el uso de fertilizantes y otros productos agroquímicos.

1.2 Suelos de ambas regiones estudiadas

1.2.1 Suelos de Burundi

Los suelos que predominan en Burundi, según la FAO (2006), son suelos de carácter ácido. Generalmente debido a la composición mineralógica, orgánica, por las condiciones climáticas, la lixiviación de nutrientes, o por la fuerte presión agrícola y ganadera, entre otros.

Durante la descomposición de la materia orgánica se generan ácidos orgánicos y otras sustancias que afectan al pH del suelo. La materia orgánica rica en humus, dispone de gran cantidad de grupos carboxílicos que aumentan la acidez del suelo. Estos compuestos liberan hidrogeniones (H^+) al medio, que disminuyen el pH del suelo. Esta disminución, afecta a la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Figura 5) y aumenta la concentración de elementos que pueden ser tóxicos como el Al^{3+} , Fe, o el Mn, que puede volverse tóxico para las plantas cuando se reduce el pH, sobre todo a niveles inferiores a 5.

Por otro lado, las fuertes precipitaciones del periodo de lluvias, también favorecen la acidificación del suelo, ya que provocan el lavado de carbonato y bases de cambio (Ca, Mg, K).

Además, existen otros factores que generan la acidez de los suelos, como la deforestación, la erosión generada por la agricultura y el sobrepastoreo debida a la expansión geográfica, etc.

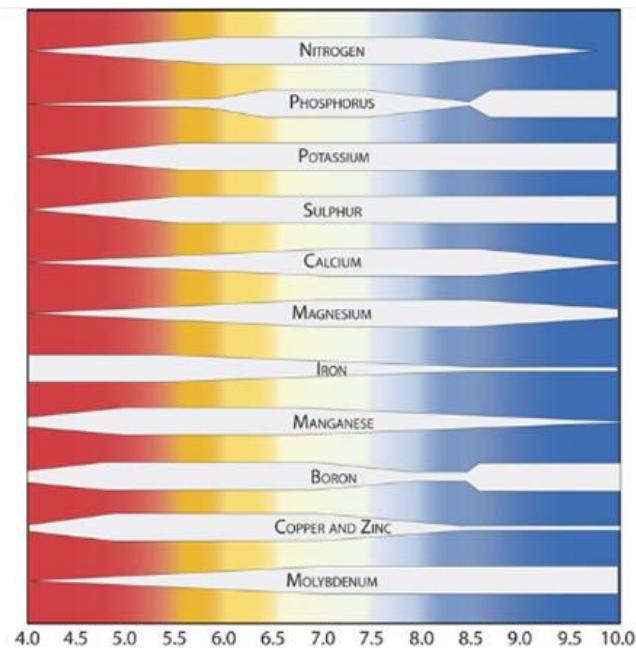


Figura 5. Disponibilidad de nutrientes para las plantas según el pH (Von Uexkull, 1986)

Según Jones et al, (2013) los suelos que predominan en Burundi son Acrisoles, Ferrasoles y Nitisoles.

- Los Acrisoles, son suelos con fuerte carácter ácido y baja saturación en bases, como resultado de una fuerte alteración. Éstos, se desarrollan a partir de la alteración de rocas ácidas. Son suelos muy pobres en nutrientes, con toxicidad generada por el aluminio y muy susceptibles a la erosión. Sobre ellos crecen bosques claros y de baja productividad.
- Los Ferrasoles, son suelos de color rojizo y amarillento. Se desarrollan a partir de rocas básicas. Son suelos con buenas condiciones físicas para el desarrollo de las plantas, pero que no disponen de buenas condiciones químicas. En general, son suelos con baja fertilidad, debido a la escasez de nutrientes, y con tendencia a la fijación de fosfatos. Además, son suelos con altos contenidos de hierro y aluminio.

- Por último, los Nitisoles, son suelos fértiles, profundos, estables y con propiedades físicas favorables. Se desarrollan como resultado de la alteración de rocas intermedias o básicas. Son suelos con textura fina, ricos en hierro y con escasa presencia de arcillas. Estos suelos suelen tener bajos contenidos de fósforo asimilable y baja saturación en bases. En ellos crece principalmente el bosque húmedo tropical o vegetación de sabana.

1.2.2 Suelos de la provincia de Jaén

La mayoría de los suelos que encontramos en la provincia de Jaén, son suelos pobres y poco evolucionados. Los más destacados son los luvisoles, litosoles, regosoles, vertisoles y cambisoles. Estos suelos se encuentran fuertemente modificados debido a la agricultura, sobre todo por el cultivo del olivo, que ocupa más del 91% de la extensión agrícola de la provincia. El laboreo intensivo y el uso de herbicidas, entre otros, han producido un incremento de la erosión hídrica, eliminando la capa edáfica superficial y favoreciendo la aparición de surcos y cárcavas.

Esto se está traduciendo en una pérdida de la capacidad productiva de la tierra y de sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

El suelo suele ser de carácter básico y su pH está en torno a 8. Cuando el pH es superior a 6,5 abundan los iones OH^- que producen la precipitación de compuestos insolubles de hierro, manganeso, cobre y zinc (figura 5), que no pueden ser asimilados por las plantas.

De los suelos citados anteriormente, el suelo que se utilizó en el ensayo es el regosol calcáreo (FAO, 2006). Estos suelos son abundantes en el centro y en el sur de la provincia de Jaén. Son suelos con escaso desarrollo y con un complejo de cambio saturado, sobre todo por cationes de calcio y magnesio. Los suelos tienen escasa profundidad y la retención de agua varía de media a baja.

Estos suelos proceden de margas miocénicas o de margas del triásico, en los que la illita es el mineral de arcilla dominante, seguida de las esmectitas, que en los cultivos suelen favorecer el desarrollo de suela de labor y las grietas en el periodo estival.

1.3 Uso de enmiendas orgánicas para mejorar las condiciones del suelo agrícola

En la actualidad, la agricultura ha estado regida por un aumento intenso de la producción, que ha contribuido al uso indiscriminado de fertilizantes y otros productos químicos, así como a un tipo de agricultura que está favoreciendo la erosión y la pérdida de fertilidad de los suelos (Hernández *et al.*, 2010). Según informes de la FAO, en menos de 200 años el hombre habrá agotado todos los suelos productivos del planeta. La degradación del suelo y la pérdida de suelo fértil, acarrearán graves consecuencias alimenticias en el futuro para una población que está en constante crecimiento (Lichtinger *et al.*, 2000).

Tradicionalmente, la materia orgánica se ha utilizado para aportar nutrientes y mejorar las propiedades de los suelos. Entre sus beneficios están, la capacidad de aglutinar las partículas favoreciendo la formación de los agregados del suelo, el aporte de nutrientes esenciales para las plantas como N, P y S, entre otros, la mejora de la capacidad de retención de agua o de la aireación y la permeabilidad del suelo, factores claves para la bioactividad, sobre todo en procesos aeróbicos. Por ello, la incorporación de fertilizantes y abonos orgánicos (Biochar, compost, bokashi, entre otros) es una práctica que debe recuperarse en la actualidad con el objetivo de mejorar las condiciones de los suelos, su fertilidad, la vida silvestre y la salud humana (Hernández *et al.*, 2010). De las posibles fuentes de materia orgánica que pueden utilizarse, tres de ellas, han sido evaluadas en este estudio (Compost, bokashi y biochar).

El **Compost** es el producto que resulta del proceso de compostaje. En este proceso se lleva a cabo la transformación de diferentes restos de materia orgánica heterogénea en un producto homogéneo, como resultado de un proceso de oxidación biológica, llevado a cabo por microorganismos, que da lugar al compost. Para fabricar el compost se deben triturar, y mezclar bien los materiales con el objetivo de favorecer el proceso de descomposición de la materia orgánica. Las condiciones de humedad, temperatura y aireación deben de ser controladas para mejorar la actividad realizada por los microorganismos, que favorecerán la fermentación y darán lugar a un material orgánico más estable (Escalante *et al.*, 2016; Cronje *et al.*, 2003). Entre los beneficios que produce la aplicación de esta enmienda pueden destacarse, la mejora de la

estabilidad de los agregados, la disminución de la compactación del suelo y la mejora de la retención de agua y la actividad biológica, entre otros (Labrador, 2001)

El **Bokashi** es un abono orgánico usado por los agricultores japoneses desde hace ya varios años. Este abono se obtiene a partir de materia orgánica fermentada mediante un proceso aeróbico de descomposición de materiales de origen animal y vegetal. Este compuesto no tiene una fórmula exclusiva. Se fabrica a partir de la suma de una gran variedad de compuestos como, por ejemplo, estiércol, cascarilla de arroz, melaza, carbón vegetal, tierra, levadura y agua. Su aplicación estimula el crecimiento de las plantas, aumenta la cantidad de microorganismos, y mejorar las características físico-químicas del suelo (Shintani, M *et al.*, 2000). Además, aporta nutrientes (N, P, K, Ca, etc) y macronutrientes al suelo, y mejora la resistencia de las plantas frente a enfermedades y plagas (FAO and AECID, 2011)

El **Biochar** es un material carbonizado obtenido a partir de biomasa con alto contenido de carbono, que ha sido pirolizado en un entorno de oxígeno nulo o muy bajo mediante procesos sostenibles (Lehmann *et al.*, 2003a). Los productos que se utilizan para elaborar el biocarbón son muy numerosos. Sin embargo, lo ideal es utilizar materias primas que no generen productos de mayor valor económico que el Biochar. Entre estos materiales encontramos, por ejemplo, residuos de cosecha, plantas secas, biomasa de árboles, residuos de la poda de olivar, entre otros (Lehmann y Joseph, 2009). Para llevar a cabo la fabricación del Biochar, debe someterse la biomasa a un proceso termoquímico conocido como pirolisis, que consiste en calentar la materia orgánica usada a una temperatura superior de 400° en ausencia de oxígeno. Durante este proceso los materiales se descomponen térmicamente liberando vapor y generando una fase sólida residual o biocarbón (Escalante, *et al.*, 2016).

Entre los beneficios que tiene el aporte de esta enmienda pueden destacarse, su potencial para mitigar el cambio climático a través del secuestro de carbono, ya que puede permanecer en el suelo de cientos a miles de años (Lehmann, *et al.*, 2009; Nguyen, *et al.*, 2009). Además, su aplicación ayuda a mejorar las propiedades del suelo, a almacenar carbono y/o retener agua. (Lehmann *et al.*, 2003b; Sohi, *et al.*, 2010).

1.4 Importancia de la Agricultura de Conservación en la disminución de las emisiones de CO₂ y su influencia en el cambio climático

El cambio climático es un cambio de la variación global del clima de la Tierra. Es debido a causas naturales y antropogénicas. Se produce a diversas escalas de tiempo y afecta a todos los parámetros climáticos (temperatura, precipitaciones, nubosidad, etc). Uno de los principales problemas que genera el cambio climático es el efecto invernadero, que se produce debido a la retención de calor del sol en la atmósfera de la Tierra debido a la formación de una capa de gases de la atmósfera [7]. Estos gases son emitidos por la industria, la agricultura y la combustión de combustibles fósiles. Estos, representan un grave problema en la actualidad y sus consecuencias pueden ser devastadoras si no reducimos drásticamente las emisiones de efecto invernadero [8].

La agricultura es una de las principales emisoras de carbono a la atmósfera y están directamente relacionada con la degradación del ecosistema. Sin embargo, un cambio en esta tendencia sería posible. Los suelos, contienen más carbono que el acumulado en la vegetación y la atmósfera. Por lo tanto, un cambio en las prácticas agrícolas ayudaría a reducir las emisiones mediante el secuestro de carbono en el suelo (Novara *et al.*, 2013). Se ha comprobado que el secuestro de carbono mediante una agricultura sostenible es una de las mejores opciones para la mitigación del cambio climático (MacLeod *et al.*, 2010). La agricultura convencional, acelera la destrucción del suelo y favorece la oxidación y la liberación de carbono en forma de CO₂ a la atmósfera. Por ello, es importante desarrollar prácticas de manejo del suelo respetuosas con el medio ambiente. En general, cuanto mayor es la reducción del laboreo, mayor es el incremento del carbono orgánico en el suelo. A su vez, la reducción del laboreo y de la aplicación de herbicidas, ayuda a reducir la erosión del suelo, otro factor que influye en la liberación de carbono. El clima, también afecta a la producción de los cultivos y a la descomposición de la materia orgánica, la cual, ayuda a mejorar las condiciones tanto físicas, como químicas y biológicas del suelo. Todos estos factores determinan la influencia del laboreo sobre la retención de carbono en el suelo.

La finalidad principal de la fijación del carbono en el suelo, no solo está relacionada con el cambio climático, sino también con la reducción de la contaminación del medio

ambiente y la degradación de los recursos naturales. Por consiguiente, también influye en la salud y el bienestar de la sociedad (Gutiérrez, 2014).

Smith et al., (1998) indican que la conversión del total de terreno agrícola a una agricultura sostenible y de conservación, ayudaría a anular las emisiones agrícolas de CO₂ en Europa. En conclusión, podría decirse que, si se modificaran las prácticas agrícolas a nivel global, podríamos reducir, al menos, una parte importante de las emisiones de carbono a la atmósfera generadas por la agricultura en la actualidad.

2. HIPÓTESIS DE TRABAJO Y OBJETIVOS

La calidad de la enmienda orgánica (compost, biochar y bokashi), la dinámica del carbono (Producción acumulada de C-CO₂) y del nitrógeno (mineralización, nitrificación y disponibilidad de nitrógeno) influirán de forma significativa en función del tipo de suelo, para dos suelos con edafoclimáticamente contrastados.

Objetivos:

1. Evaluar la calidad de cada uno de los tipos de materia orgánica utilizados en el ensayo (Biochar, Bokashi y compost).
2. Evaluar la fitotoxicidad de las enmiendas orgánicas a partir del análisis del índice de germinación.
3. Evaluar el potencial de secuestro carbono de dos suelos con pH contrastado (Ácido y Básico) y con aporte de diferentes tipos de materia orgánica.
4. Evaluar la liberación de nutrientes a través de la dinámica del nitrógeno en forma de amonio y nitrato.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 Recogida de las muestras

Se tomaron muestras de dos tipos de suelo de pH contrastado, un suelo ácido tropical procedente de Ngozi (Burundi) y otro básico de olivar (Jaén). En ambos se recogieron varias muestras, recogidas al azar, de los 20 cm superiores del suelo y se transportaron al laboratorio. Para el desarrollo de este ensayo se tamizaron previamente ambas muestras de suelo con una malla de 2mm de diámetro para

separar la fracción fina, y se conservaron en un ambiente seco. Cada una de las dos muestras de suelo se subdividió en cuatro submuestras a las que se adicionaron tres tipos diferentes de compuestos orgánicos (Biochar, Bokashi y Compost), dejando una de las submuestras sin ninguna fuente de materia orgánica (Control). Además, se consideran tres blancos (Sin sustrato).

3.2. Pretratamientos del suelo

Los diferentes aportes orgánicos se fabricaron con materias primas obtenidas en Burundi y fueron trasladados al laboratorio. Posteriormente se tomaron 100g (Suelo seco) que se preincubaron durante 5 días a 25°, al 60% de su capacidad de retención de agua (WHC). La capacidad de campo se determinó a partir de una muestra, secada previamente en la estufa, de cada uno de los suelos. Se añaden 20 gramos de suelo en un sistema de filtrado y, posteriormente, se adicionan 20 ml de agua. Para conocer la capacidad de campo (100%) se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{WHC (100\%)} = V_r / W_s$$

Donde V_r representa el volumen de agua retenido y W_s el peso de la muestra de suelo.

3.3. Test de fitotoxicidad

Con el objetivo de observar la capacidad tóxica de las diferentes fuentes de materia orgánica, y siguiendo las pautas marcadas en el método Zuccoci et al., (1981) se realizó el test de fitotoxicidad.

En primer lugar, se humedecieron las muestras (60%). Tras reposar durante 30 minutos, se añadieron 13,5 ml de agua destilada por cada gramo de muestra seca, se centrifugaron durante 15 minutos (3000 r.p.m) y, por último, se filtraron.

Por otro lado, se prepararon 10 placas de Petri de 10 cm en las que se añadieron 10 semillas de berro (*Lepidium sativum*) y 1ml de extracto en cada una de ellas.

Tras un periodo de incubación de 72 horas, en oscuridad y a 27°C, se tomaron tres medidas, la longitud de las partes aéreas de las semillas para observar el crecimiento, y la longitud de las raíces y el número de semillas germinadas para calcular el índice de germinación.

Por último, se calculó el índice de germinación mediante la siguiente fórmula:

$$IG (\%) = G (\%) * L (\%) / 100$$

Donde G representa el porcentaje de germinación de las semillas y L el porcentaje de elongación de las raíces.



Figura 6. Ensayo de germinación con semillas de *Lepidium sativum*.

3.4. Preparación de las enmiendas orgánicas

Las enmiendas que se utilizaron en el ensayo (Biochar, Bokashi y Compost) se fabricaron en Burundi.

El **biocarbón** se compró en el mercado local de la población. Este material se fabricó utilizando como base biomasa de Eucalipto (*Eucalyptus*). Para producir Biochar, se debe de someter a la biomasa a un proceso de pirolisis en condición de anoxia. Para ello, se fabrican pequeñas fosas, de aproximadamente un metro de profundidad, en las que se inicia un fuego al que se añade la madera seca hasta llenar por completo la cavidad. Posteriormente, se cubren las fosas con una capa de unos 20cm de espesor de hojas, y otra, con el mismo espesor, de tierra. Finalmente, tras dos días, se extrae el material carbonizado resultante.



Figura 7. compra de biochar en un mercado local de Ngozi

El **compost** se fabricó a partir de estiércol de vaca, en su mayor parte, y paja, que se dejaron apilados durante un periodo de unas dos semanas. periodo insuficiente para obtener un material bien compostado. Además, no se realizó un control periódico de la temperatura y la humedad, por lo tanto, el material obtenido fue básicamente estiércol de vaca semicompostado.



Figura 8. Pila de compost

Para fabricar el **Bokashi** no existe una fórmula exclusiva. La composición depende de los materiales existentes en la comunidad en la que se produzca. En este caso, los materiales que se usaron se obtuvieron en el área en la que se fabricó el compuesto, Burundi. En primer lugar, se fueron haciendo varias capas con los diferentes materiales, alternándolos, con objeto de conseguir una mezcla lo más homogénea posible. Los materiales que se usaron fueron, tierra cernida, obtenida en el área de fabricación, estiércol de vaca, que también se usó para fabricar el compost, Biochar, cascarilla y salvado de arroz, ceniza cernida y pescado seco. Una vez homogeneizados los materiales, se realizó una mezcla de agua y melaza en un cubo, a la que se añadió semolina. Una vez terminada, se procedió a la mezcla de la pila de materia sólida con el contenido líquido del cubo (Agua, melaza y semolina). Finalmente se adicionó agua hasta conseguir la siguiente textura (figura 9)



Figura 9. Textura idónea para la fabricación del Bokashi

3.5. Análisis de los suelos y de las enmiendas orgánicas

pH de las muestras de suelo

El pH del suelo fue medido con un pH-metro modelo Crison micro pH 2000, en una suspensión 1:2,5 (w/w) suelo/agua destilada.



Figura 10. pH-metro (Universidad de Jaén)

Materia orgánica del suelo

Se obtiene determinando previamente el contenido de carbono orgánico de la muestra de suelo y multiplicándolo por 1,724 (coeficiente de Waskman, para pasar de carbono orgánico a materia orgánica). La obtención del carbono orgánico se llevó a cabo por el método de Sims & Haby modificado (Mingorance *et al.*, 2007), que consistió en una digestión ácida con dicromato potásico 1N y ácido sulfúrico concentrado a 155°C durante 30 minutos, midiendo la absorbancia de las muestras digeridas a 600 nm utilizando un espectrofotómetro BOECO-S200. Los resultados se expresan en percentage.

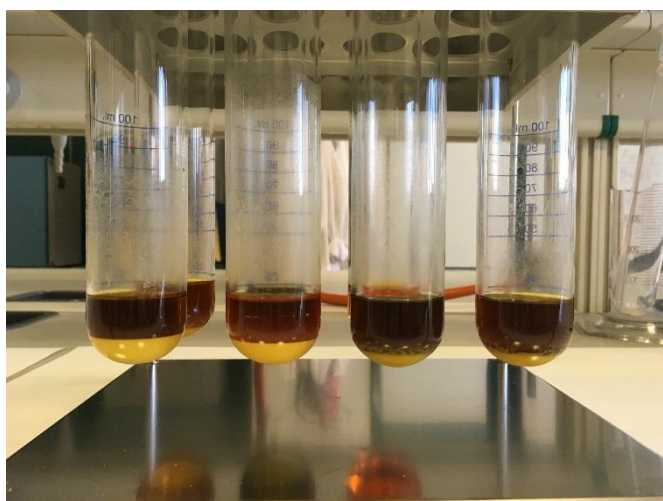


Figura 11. Determinación del Carbono Orgánico

Método análisis elemental CHNS-O

El análisis elemental de las muestras de enmiendas orgánicas se realizó con el Analizador Elemental modelo Flash EA1112 CHNS-O de Thermo Finnigan que permite el análisis químico cuantitativo de Nitrógeno, Carbono, Hidrógeno, Azufre y Oxígeno en muestras sólidas o líquidas, en un rango de concentraciones que abarca desde el 0,01% (100 ppm) al 100% del contenido total del elemento presente en la muestra.



Figura 12. Analizador elemental (servicios técnicos de investigación UJA)

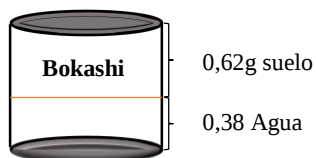
3.6. Diseño experimental

Se prepararon 24 unidades experimentales (2x4x3) para las que se usaron frascos de plástico de 250 ml. Cada uno de ellos se humedeció al 60% de su capacidad de retención hídrica. Se tomaron dos suelos de pH contrastado a los que se añadieron tres tipos diferentes de materia orgánica (biochar, bokashi, compost), equivalente a 8mg de C. orgánico g⁻¹ suelo. Un conjunto de muestras no recibió ningún aporte (Control). Además, se prepararon tres blancos, sin adicción de sustrato, con objeto de conocer la cantidad de CO₂ en cada frasco, la variable a evaluar.



Figura 13. Unidades experimentales en cámara de cultivo

La cantidad de enmienda que se añadió para aportar 8mg de carbono orgánico, se obtuvo a partir de los resultados de CO obtenidos en la tabla 2.



De cada gramo, 0,38g serían de agua. Por lo tanto, de los 0,62g de suelo restantes, el 11,64% es CO (Ver tabla 2).

$$x = \frac{0,62 * 11,64}{100} = 0,072g^{-1} \text{ de suelo.}$$

Si el objetivo es añadir 0,8g de CO g^{-1} de suelo. Tendremos que añadir 11,11g de Bokashi fresco a los 100g de suelo que contiene el frasco.

$$x = \frac{0,8 * 100}{7,2} = 11,11g \text{ de Bk fresco}$$

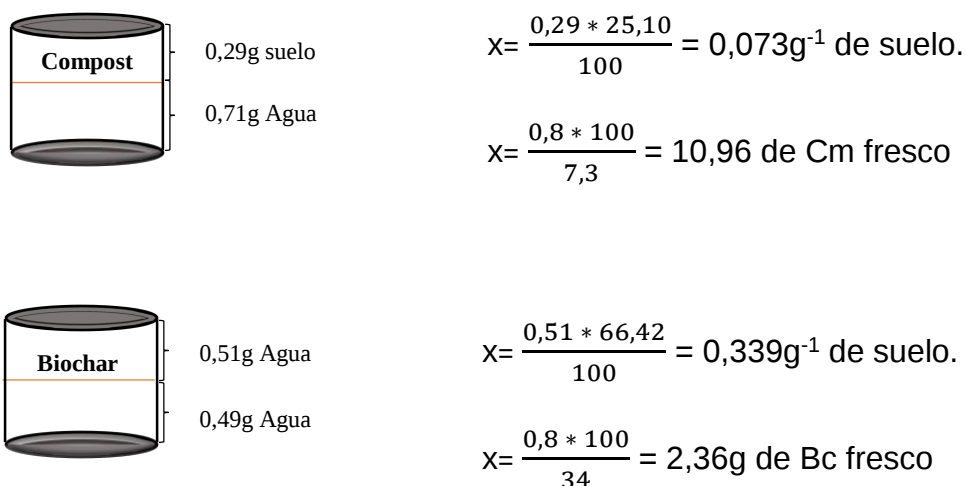
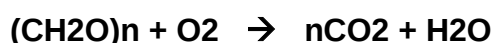


Figura 14. Suelo y agua g⁻¹ de cada enmienda orgánica

El desprendimiento de CO₂ emitido por cada una de las unidades experimentales, como resultado de la mineralización de carbono heterótrofo, se midió en distintos intervalos de tiempo de forma continua, más frecuente durante los primeros días.

Durante proceso de incubación, que tuvo una duración de 69 días, se realizaron siete medidas de la tasa de respiración, cuatro de ellas con un margen de 3, 5, 9 y 10 días, respectivamente, y el resto, cada dos semanas. Para ello, se usó el método de trampa alcalina descrito por Anderson, (1982). Este método consiste en introducir un vial de Hidróxido de Sodio (NaOH) en los frascos, que se mantendrán herméticamente cerrados, que tendrán que abrirse una vez entre cada medida, con el objetivo de evitar las condiciones de anaerobiosis. (La cantidad añadida de este compuesto será de 10ml). La ecuación genérica para el proceso de respiración es la siguiente:

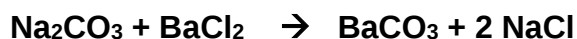


El CO₂ liberado, procedente de la respiración de los microorganismos en el suelo, reacciona con el NaOH que contiene el vial formando carbonato sódico, conocido comúnmente como sosa. La reacción en la cual el CO₂ es adsorbido es la siguiente:



La cantidad de CO₂ adsorbido es equivalente a la cantidad de NaOH consumido. Para conseguir que reaccione todo el CO₂ se añade cloruro de bario (BaCl₂), que forma

como resultado carbonato de bario que, al ser insoluble, precipita retirando el C de la fase líquida.



El NaOH remanente, que no es neutralizado por el ácido carbónico, se titula con ácido clorhídrico (HCl). Finalmente, de la diferencia entre el hidróxido sódico inicial y el resultante, obtenemos la cantidad de CO₂ producido por respiración en cada unidad experimental.

Posteriormente, la producción acumulada de CO₂ procedente del carbono orgánico, se ajustó a una función de doble exponencial de dos parámetros para calcular el contenido y la tasa de descomposición del carbono.

$$F=a(1-\exp(-bx))$$

Donde a representa la cantidad de carbono susceptible de descomponerse y b la tasa de mineralización por día.

Para evaluar la dinámica del nitrógeno inorgánico (Amonio y nitrato), se realizaron varias extracciones a lo largo de la incubación (7, 20 ,33 ,48 ,61 días) con cloruro potásico (Figura 15). Para ello, se tomaron dos gramos de suelo de cada frasco, a los que se le añadieron, posteriormente, 20ml de KCl 1M. Después de agitar durante una hora, se filtró el líquido resultante y se congeló hasta que se realizaron todas las extracciones.

El análisis del contenido de amonio y nitrato se analizó mediante la metodología propuesta por Keeney & Nelson, 1982. Las tasas de mineralización de nitrógeno neto (NM) y la nitrificación (NN) se estimaron mediante las siguientes ecuaciones Hart, S.C., *et al.*, 1994.

$$\text{NM } (\mu\text{g N g}^{-1} \text{ d}^{-1}) = \frac{(\text{NO}_3^- + \text{NO}_4^+)_{\text{final}} - (\text{NO}_3^- + \text{NO}_4^+)_{\text{inicial}}}{\text{Tiempo de incubación (días)}}$$

$$\text{NN } (\mu\text{g N g}^{-1} \text{ d}^{-1}) = \frac{(\text{NO}_3^-)_{\text{final}} - (\text{NO}_3^-)_{\text{inicial}}}{\text{Tiempo de incubación (días)}}$$



Figura 15. Proceso extracción con KCl

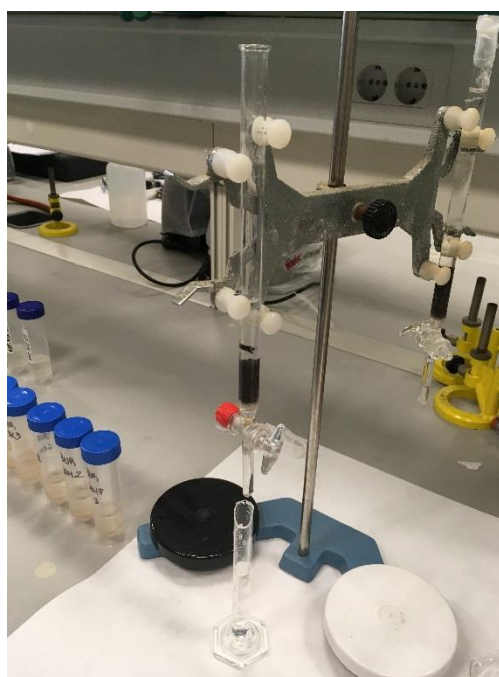


Figura 15. Proceso de determinación de nitrato y amonio

3.7. Análisis estadístico de los resultados

Los análisis estadísticos se realizaron utilizando los softwares Statgraphics Centurion XVI (Stat Point Technologies, Inc.) [9] y STATISTICA [10], ambos para Windows. Los datos se calcularon como medias aritméticas y se acompañan con su desviación

estándar. El ANOVA de una vía se utilizó para dilucidar las diferencias significativas de los efectos de los tratamientos, así como un test de rango múltiple. El método empleado para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher y un post hoc test después del ANOVA. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0. Del mismo modo, para las variables: cantidad de carbono susceptible de ser descompuesto a largo plazo y su tasa de descomposición, se llevó a cabo una two-way ANOVA empleando un ANOVA factorial, así como el Fisher post hoc test, con el fin de conocer el efecto de las interacciones entre el tipo de suelo y el tipo de enmienda orgánica empleada.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización inicial de la calidad de los suelos y de las enmiendas

La Tabla 1 presenta diferentes propiedades químicas de dos suelos con condiciones totalmente diferentes de pH. Por un lado, el suelo de Burundi presenta unas condiciones medianamente ácidas, mientras que el suelo de margas, procedente de un olivar tipo de la provincia de Jaén, es de carácter básico. Los valores establecidos como ideales en lo que se refiere a la relación C/N están comprendidos entre 12 y 13, y no deben ser superiores a 15. El suelo de Burundi tiene un valor muy elevado (17), ya que supera el valor establecido como límite (15), sin embargo, el valor obtenido para margas es levemente inferior a este, aunque no está dentro del rango ideal.

La Tabla 2 muestra los porcentajes iniciales de nitrógeno, carbono, relación C/N e índice de germinación. Todos ellos son significativamente diferentes para los tres tipos de enmiendas orgánicas ensayadas. El valor más elevado significativamente para el nitrógeno lo obtuvo el compost, que es 3,6 veces mayor que el bokashi, que obtuvo el menor resultado. Para el carbono orgánico, sin embargo, el resultado más elevado se obtuvo para el Biochar.

Estos valores están directamente relacionados con la relación C/N. Para que se produzca una correcta asimilación del carbono, el nitrógeno debe ser asimilado en cantidades equilibradas y determinadas por la relación C/N de la biomasa microbiana. Para que la mineralización neta sea positiva y haya liberación de nitrógeno inorgánico,

la cantidad de nitrógeno presente en la descomposición de los compuestos orgánicos, debe ser superior que la requerida por los organismos (Corbeels *et al.*, 1999).

Los valores más equilibrados para la relación C/N se recogen en el Bokashi, que está en torno a 20, que es el valor adecuado para este parámetro de una enmienda orgánica. El compost tiene un valor relativamente bajo (13), lo que indica que es un material orgánico de peor calidad. Esto puede deberse a un alto valor del nitrógeno resultado, probablemente, del bajo tiempo de maduración del estiércol que forma parte constituyente de este compost no maduro.

Los resultados obtenidos para el test de fitotoxicidad están representados a través del índice de germinación (IG), en % (Tabla 2). Para este parámetro, se puede observar que ninguno de los tratamientos resulta fitotóxico para el desarrollo vegetal. En todos los casos, el IG superó el 100%, alcanzando su valor más elevado para el Bokashi (181,3%). Esto quiere decir que las enmiendas orgánicas utilizadas favorecen y potencian el crecimiento del berro (*Lepidium sativum*), la planta tipo utilizada en este ensayo. El valor mínimo lo obtuvo el Biochar (129,68%), aunque no se puede establecer si las diferencias son significativas, al no disponer de réplicas para el ensayo.

Tabla 1

Propiedades químicas analizadas de los suelos empleados (valores medios $\pm$ desviación estándar). Nitrógeno (N), carbono orgánico (CO), materia orgánica (MO) y pH. En el suelo de olivar (Margas) hay un valor único (análisis efectuados en el laboratorio CSR-servicios, Úbeda).

	Burundi	Olivar
pH (H ₂ O)	6,03 $\pm$ 0,09	8,14
N (%)	0,22 $\pm$ 0,03	0,08
CO (%)	3,83 $\pm$ 0,11	1,19
C/N	17,4	14,9
MO (%)	6,60	2,05

Tabla 2

Valores medios $\pm$ desviación estándar de Nitrógeno (N), carbono orgánico (CO), relación C/N e índice de germinación (IG) de los tres aportes de materia orgánica: Biochar, Bokashi y Compost. Las diferentes letras de cada columna denotan diferencias significativas ($P < 0,05$).

	N (%)	CO (%)	C/N	IG
Biochar	0,82 $\pm$ 0,00 ^a	66,42 $\pm$ 0,21 ^a	81,00 $\pm$ 0,51 ^a	129,68
Bokashi	0,59 $\pm$ 0,02 ^b	11,64 $\pm$ 0,17 ^b	19,60 $\pm$ 0,47 ^b	181,36
Compost	1,92 $\pm$ 0,03 ^c	25,10 $\pm$ 0,23 ^c	13,00 $\pm$ 0,35 ^c	164,52

4.2. Respiración de los suelos como resultado de la mineralización de carbono procedente de los diferentes aportes de materia orgánica.

La Figura 16, muestra las tasas de respiración para dos suelos de pH contrastado, uno medianamente ácido, localizado en la zona de Ngozi (Burundi), y otro de olivar de carácter básico, situado en la provincia de Jaén (España). En ambos se puede observar una tendencia similar, que muestra unos valores más elevados en el comienzo del ensayo, justo después de añadir las diferentes fuentes de materia orgánica. Dichos valores iniciales se deben a la actividad de los microorganismos, que aumenta en respuesta a la adicción de materiales ricos en sustancias fácilmente degradables, como proteínas y azúcares (Lerch *et al.*, 1992). Este incremento puede observarse en otros estudios que analizan la respiración, por ejemplo, el realizado con abonos orgánicos de *Lupinus montanus* (Guerrero *et al.*, 2012) o el elaborado con aportes de compuestos resultantes de la poda del olivo (Gómez *et al.*, 2016). Tras estos días, ambos suelos experimentaron un descenso exponencial de las tasas de producción de CO₂, debido a la disminución de las fracciones orgánicas de carbono lábil presentes en los materiales añadidos (Bruun *et al.*, 2008). Dicho descenso de los valores de C-CO₂ se puede observar, por ejemplo, en el estudio realizado por Acosta *et al.* (2006) con estiércol de cabra, residuos de la poda de la sábila (*Aloe vera*) y con lodos provenientes de aguas residuales. Resultados similares se dieron también en el ensayo realizado por Gómez *et al.* (2016), con restos de poda de olivo quemados (ceniza y biochar) y no quemados. Este hecho indica que el proceso de mineralización de carbono está dividido en dos etapas, una que corresponde al incremento de la actividad biológica, en la que los microorganismos degradan las sustancias fácilmente

biodegradables, como azúcares o lípidos, entre otros, y una segunda, definida por un descenso en dicha actividad, como consecuencia de la disminución de las sustancias de fácil degradación (Guerrero *et al.*, 2012).

Independientemente del suelo, las tasas de respiración aumentaron de forma significativa con la adicción de cada una de las fuentes de carbono. Los resultados obtenidos con la adición de biochar en el suelo de margas no aumentaron la mineralización de carbono. Resultados semejantes se obtuvieron en ensayos con biochar fabricado a partir de residuos de arroz (Knoblauch *et al.*, 2014) o con restos de poda de olivo (Gómez *et al.*, 2016). Sin embargo, dichos valores, para el día 7 del proceso de incubación, fueron superiores en el suelo de Burundi frente al suelo control (11 hasta 23 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$). Esta diferencia se ve reflejada en el parámetro de carbono descompuesto de la tabla 4. Esto podría deberse a una mayor actividad biológica en el suelo de Burundi tras la adicción, debido a que los suelos entre pH 6 y 7, como es el caso de Burundi (pH 6) presentan mejor régimen biológico, ya que tienen mayor disponibilidad de nutrientes en comparación con suelos tanto ácidos, como básicos, como es el caso del suelo de olivar, que tiene un pH de 8,14 (Nantes., 2014). Resultados similares pueden observarse en un ensayo que consistió en la adición de biochar a tres suelos con condiciones diferentes de pH. Aunque los resultados de este estudio indican que la actividad biológica, en general, es más intensa en los suelos de olival.

La degradación máxima para las enmiendas empleadas se obtuvo al comienzo del experimento. Esto puede deberse a que la fracción de carbono disponible (Lábil) del biochar usado en el ensayo se degrada con relativa rapidez (Bruun, 2008).

Los resultados más elevados para las tasas de producción diaria fueron superiores en el suelo de olivar (46 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$) frente a los obtenidos en Burundi (40 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$). Además, dichos resultados variaron en función del tipo de suelo, obteniendo valores superiores del compost frente al bokashi en Burundi (40,5 frente a 37,7 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$, respectivamente), ocurriendo lo contrario en el suelo de olivar (46,6 frente a 45,4 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$) en el que los valores de bokhasi fueron levemente superiores, aunque la tabla 4, podemos ver que las tasas de descomposición de ambas enmiendas para este suelo fueron significativamente diferentes.

La figura 17, muestra la producción acumulada de C-CO₂ emitido por ambos suelos y las diferentes fuentes de carbono orgánico. En ella, se observa que la cantidad de carbono respirado es mayor para las enmiendas con Bokashi y compost. Los resultados para el biochar fueron menores. Esto se debe a que el biochar, es un tipo de materia orgánica más estable, y la mayor parte de su carbono es refractario, por lo tanto, es más difícil de descomponer por los microorganismos, obteniendo así, valores menores de emisión de CO₂ que los suelos enmendados con bokashi y el compost (Ayuso *et al.*, 1996). Esto es muy interesante desde el punto de vista del secuestro de carbono, ya que permanece durante largos periodos de tiempo en el suelo sin alterarse.

Según se aprecia en la figura dos, a producción acumulada de C-CO₂ fue mayor en el suelo de olivar que en el de Burundi durante los 69 días de incubación. El valor más elevado para dicho suelo, fue de 963µg C-CO₂ acumulado g⁻¹, frente a los 561,5 alcanzados en el suelo de Burundi, siendo la proporción de carbono orgánico emitido 1,71 veces mayor. Estos valores fueron alcanzados por el compost, en el suelo de olivar, y por el bokashi, en el suelo de Burundi, aunque en este último los valores fueron muy similares a los obtenidos en el proceso de incubación del compost, que obtuvo una respiración acumulada de 560,5µg C-CO₂ acumulado g⁻¹. Sin embargo, no ocurrió lo mismo para el suelo de olivar, en el que el promedio de los valores de respiración de las enmiendas con bokashi, fue inferior a los del compost, que acumuló 801,7 C-CO₂ g⁻¹, siendo las diferencias estadísticamente significativas.

En ambos suelos se observa una tendencia de la respiración a estabilizarse. En la figura 18 (Sin control) observamos que la tendencia a estabilizarse es más notable en el suelo de Burundi, ya que la respiración se reduce considerablemente a partir del día 30. Estos resultados son similares a los obtenidos con fuentes de materia orgánica procedente de residuos por García & Ribeiro, (2008), que indicaron, que la descomposición de dichos residuos solo era apreciable hasta 30 días posteriores a su aplicación.

Las dinámicas de la descomposición del carbono orgánico de las diferentes enmiendas, se ajustaron significativamente a un modelo doble exponencial de dos parámetros (Tabla 4). De acuerdo con el modelo, se pudieron observar diferencias significativas en ambos suelos. La tasa de carbono susceptible de descomponerse a largo plazo fue más elevada para el compost en el suelo de olivar, que obtuvo un valor

de 780,25 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$, diferenciándose significativamente del resto. En el biochar obtuvo resultados similares independientemente del tipo suelo. En Burundi, no se observaron diferencias significativas entre las réplicas de bokashi y compost (418,66 y 423,80 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$, respectivamente). Sin embargo, en el suelo de olivar, el compost tiene unos valores significativamente muy superiores respecto al bokashi de este suelo, y al compost y el bokashi de Burundi.

En general, las tasas de descomposición del carbono fueron significativamente diferentes entre ellas, a excepción del biochar y el bokashi en el suelo de margas, que presentaron tasas significativamente similares. La tasa de descomposición corresponde al biochar en el suelo de Burundi obtuvo el valor máximo, y la menor, fue para el compost en olivar.

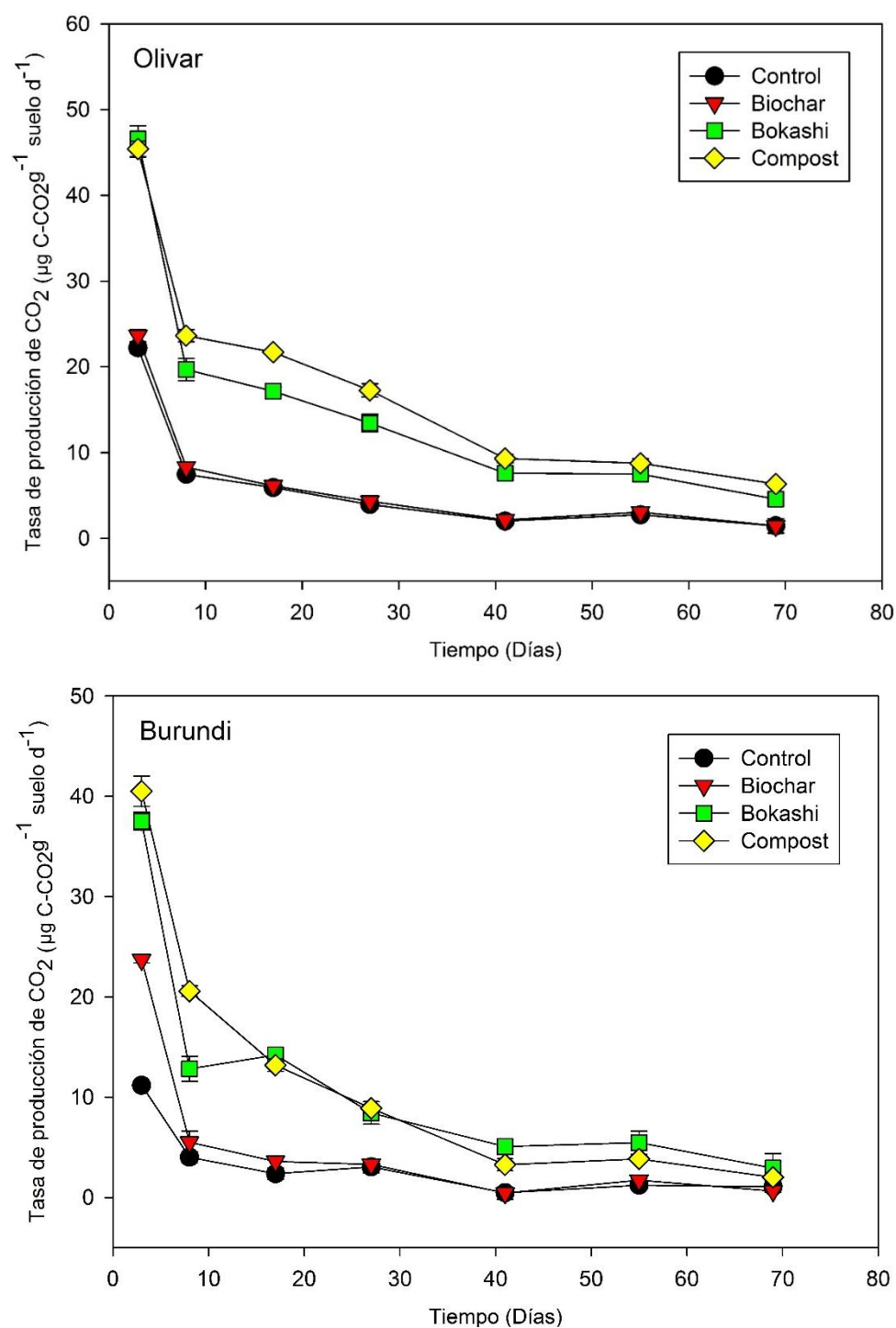


Figura 16. Dinámica de la tasa de respiración ($\mu\text{g C-CO}_2$) de dos suelos, uno de margas (Olivar provincia de Jaén) y otro ligeramente ácido (Burundi), ambos con 8mg de C g^{-1} de suelo en forma de Biochar, Bokashi y Compost, dejando una réplica sin adicción de Control. Las diferentes letras denotan diferencias significativas ($P < 0,05$).

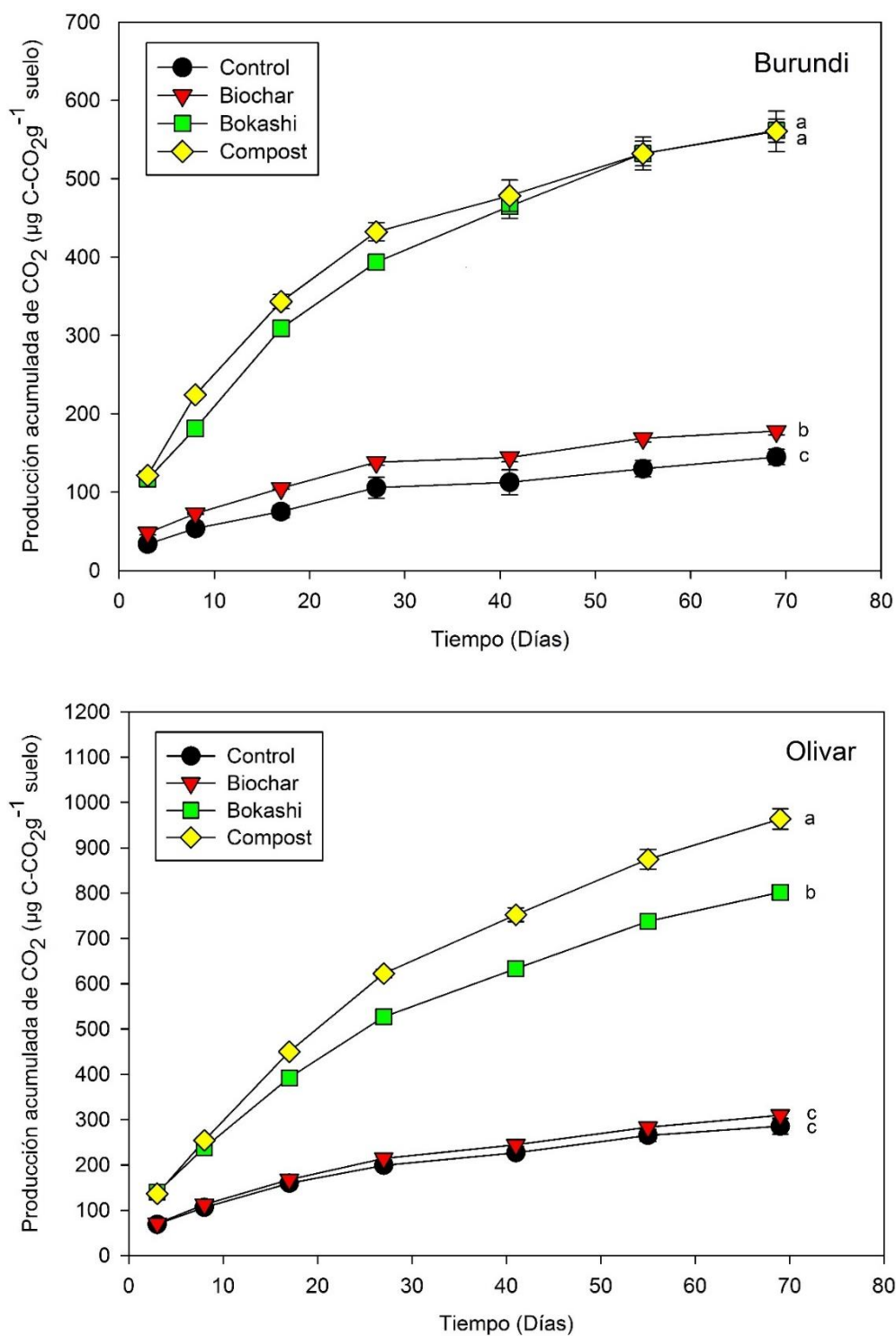


Figura 17. Cantidad acumulada de carbono respirado ($\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$) durante 69 días de incubación en dos suelos de pH contrastado, que recibieron 8mg de CO en diferentes aportes (Valores medios $\pm$ desviación estándar).

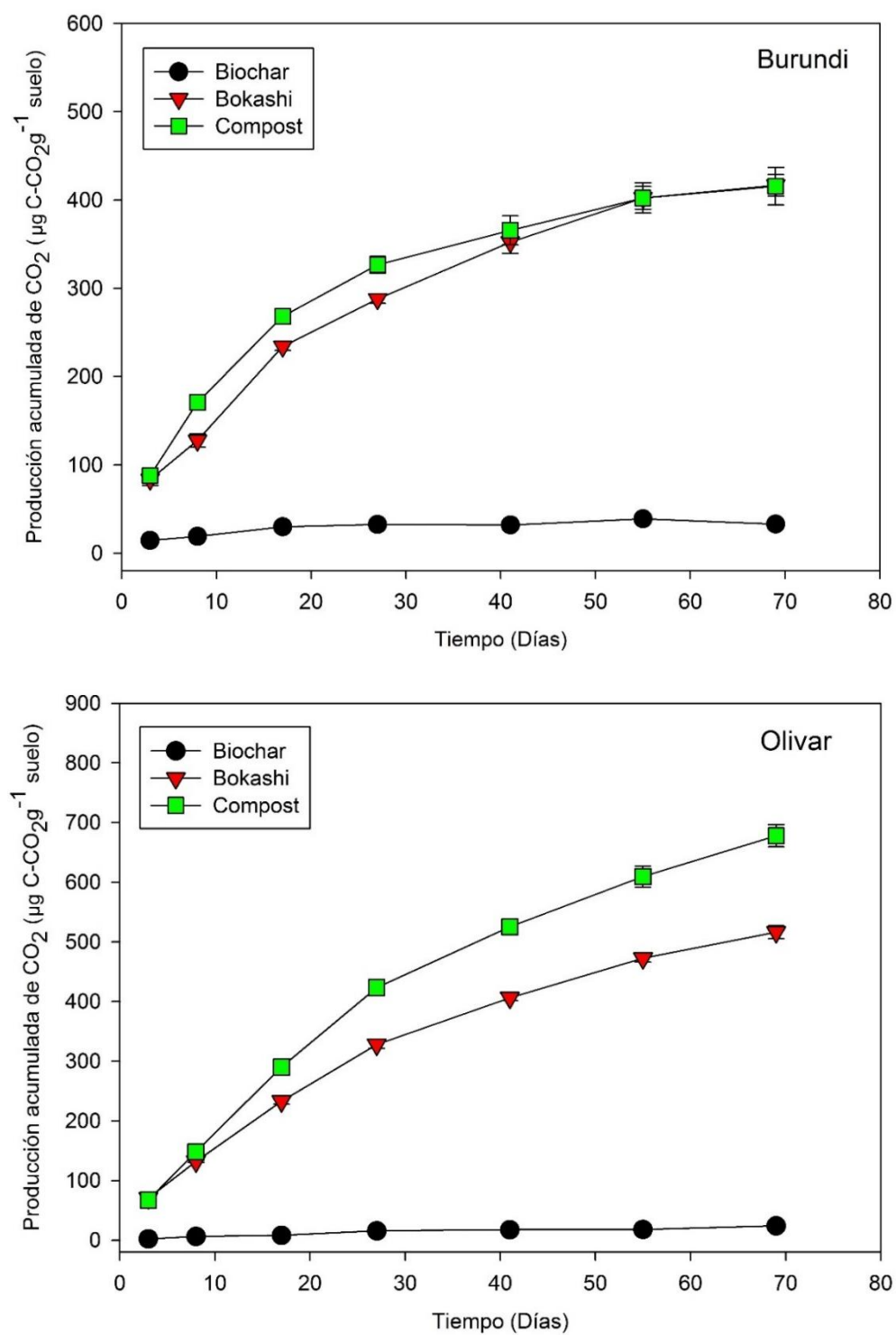


Figura 18. Respiración de carbono procedente de diferentes fuentes de carbono orgánico (Biochar, Bokashi y compost) en suelos de pH contrastado (Burundi y olivar) durante una incubación de 69 días (Valores medios $\pm$ desviación estándar).

Tabla 4

Tasa Carbono susceptible de ser descompuesto a largo plazo (C Total) y tasa de descomposición (K) estimados mediante el ajuste a una función exponencial de 2 parámetros con sus respectivos coeficientes de regresión R^2 . Ambos son obtenidos como resultado de las emisiones acumulativas de C-CO₂ menos el suelo control (Promedio $\pm$ Desviación estándar). Diferentes letras en la misma columna indican que existen diferencias significativas ($P < 0,05$).

Suelo	Fuente de CO	C Total	K (b)	R ²
Burundi	Biochar	34,54 $\pm$ 2,983 ^a	0,119 $\pm$ 0,015 ^a	0,909
	Bokashi	418,66 $\pm$ 8,973 ^b	0,044 $\pm$ 0,004 ^b	0,993
	Compost	423,80 $\pm$ 9,343 ^b	0,063 $\pm$ 0,003 ^c	0,996
Olivar	Biochar	21,58 $\pm$ 2,794 ^a	0,029 $\pm$ 0,008 ^{ab}	0,965
	Bokashi	598,39 $\pm$ 3,393 ^c	0,031 $\pm$ 0,002 ^{ab}	0,998
	Compost	780,25 $\pm$ 15,321 ^d	0,027 $\pm$ 0,001 ^d	0,999
		F ratio	F ratio	
Tipo de suelo		217,24	113,99	
Fuente de CO		881,81	25,64	
Tipo de suelo x Fuente de CO		92,66	27,06	

4.3. Dinámica del nitrógeno tras la aplicación de las diferentes enmiendas orgánicas.

En la figura 19, están representados los diferentes valores de nitrógeno disponible (nitrato y amonio) para dos suelos contrastados, y que han recibido aportes de diferentes tipos de materia orgánica. El nitrógeno disponible para el suelo sin enmienda (control) aumentó para ambos suelos, presentando un crecimiento más destacado entre los días 34 y 50, para el suelo de olivar (58,43 y 90,68 $\mu\text{g N-NH}_4 + \text{NO}_3 \text{ g}^{-1}$, respectivamente). En general, en las dos gráficas, tanto para Burundi como para olivar, el comportamiento de nitrógeno disponible tiene un comportamiento similar durante todo el periodo de incubación para las tres enmiendas y el control.

Este comportamiento se ve reflejado en el nitrógeno disponible al final del periodo de incubación. En el suelo de Burundi, no hay diferencias significativas entre biochar, bokashi y control, aunque hay una tendencia a que el bokashi aporte una mayor cantidad de nitrógeno disponible. Cabe destacar que el compost aporta una cantidad significativamente menor de este nitrógeno disponible. Para el caso del olivar, el comportamiento al final del periodo de incubación es idéntico al de Burundi,

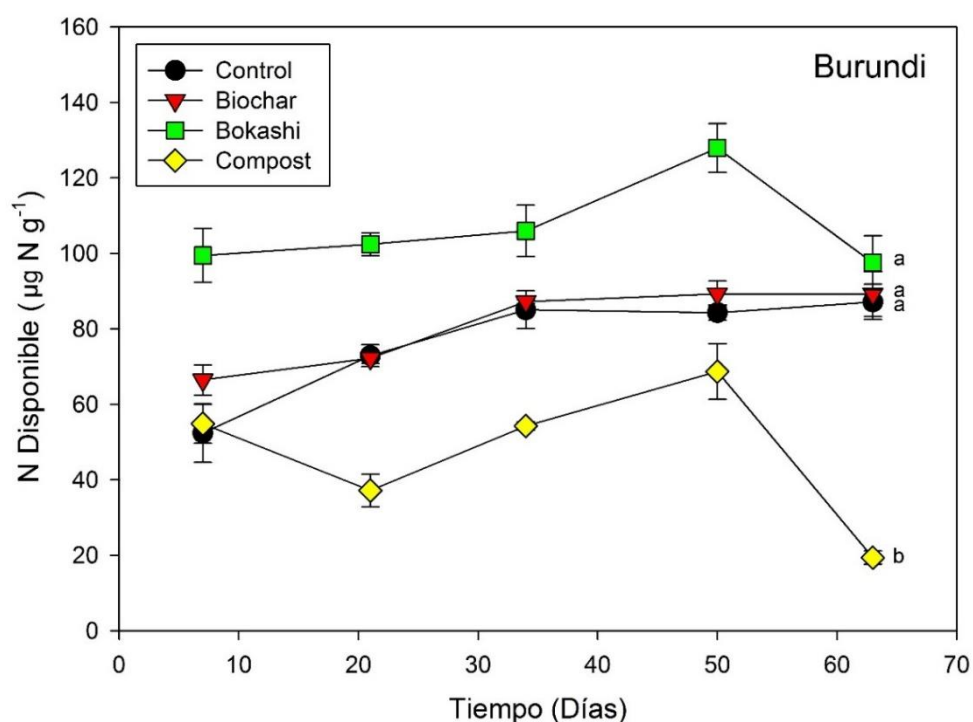
encontrando diferencias estadísticamente significativas entre todos los tratamientos. A la luz de estos datos podemos afirmar que el bokashi aporta un elemento tan esencial como el nitrógeno de forma más eficiente en relación con las otras enmiendas empleadas. Expresando estos resultados en forma de valores, los más elevados, tanto al inicio como al final, para el suelo de Burundi y de Olivar, fueron para las unidades experimentales que recibieron esta enmienda, siendo estos 1,9 y 1,7 veces mayores, respectivamente, que las muestras que no recibieron ninguna enmienda. Esto se manifiesta también en los resultados obtenidos para las tasas mineralización y nitrificación neta para esta enmienda (Figura 20).

Ninguna de las enmiendas presentó diferencias estadísticamente significativas para ambas tasas, a excepción del compost para ambos suelos, y del bokashi para la tasa de mineralización neta en el suelo de olivar. Cabría destacar que, para ambas tasas en el suelo de Burundi, la tendencia (no estadísticamente significativa) es que los valores medios para la enmienda de Bokashi son superiores. La tasa de mineralización más elevada (Bokashi) se alcanzó en torno a los 50 días en el suelo de Burundi ($1,88 \mu\text{g N-NH}_4 + \text{NO}_3 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$), aunque no se observaron diferencias significativas respecto a la réplica control. Dichos resultados se obtuvieron en torno al día 63 para el suelo de olivar ($1,514 \mu\text{g N-NH}_4 + \text{NO}_3 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$), en el que si se pudieron observar diferencias significativas respecto al resto de enmiendas (datos no mostrados).

Tanto las tasas de mineralización como las de nitrificación neta del compost fueron del orden de 0,25 en el suelo de olivar. En Burundi, se obtuvieron tasas negativas tanto de mineralización como de nitrificación, lo que indica una inmovilización de nitrógeno. Datos similares se obtuvieron en otros estudios, como el realizado por Cerrato *et al*, (2007), que estudió la mineralización de varios abonos orgánicos (Bokashi, compost y lombricompost). Aunque en su caso, los resultados de mineralización negativos fueron para el Bokashi, el cual tenía una relación C/N muy elevada. En este estudio, los mejores resultados se han obtenido para los suelos enmendados con Bokashi, el cual tiene una relación C/N más equilibrada, según el límite entre netos positivos y negativos impuesto por Palm y Rowland (1997). Esto mismo ocurre para el compost y el lombricompost, con relaciones de C/N de 20 y 19, respectivamente, en el ensayo realizado por Cerrato *et al*. (2007).

Esto podría deberse a que la cantidad de nitrógeno presente en el compost, es menor que la requerida por la biomasa microbiana, generando así, la inmovilización del N inorgánico, el cual se obtiene del suelo para completar el proceso de descomposición (Corbeels *et al.*, 1999). Aunque esta relación no puede explicar por si sola todas las diferencias que ocurren en la mineralización del nitrógeno, ya que esta puede ser diferente para compuestos orgánicos con las mismas relaciones de C/N. Otros estudios como los expuestos por Rowell *et al.* (2001), que indican que algunos compuestos orgánicos como polifenoles, proteínas o carbohidratos solubles, entre otros, también podrían estar relacionados con la descomposición de residuos orgánicos y la mineralización de nitrógeno.

Las tasas de mineralización, en el caso del biochar, no se observaron cantidades apreciables de nitrógeno procedentes de la mineralización. Estas, como comentaba al inicio, fueron incluso menores que las producidas por el control por el suelo de olivar sin enmienda añadida. Esto puede observarse también en la gráfica de N disponible (Figura 5). Resultados similares fueron obtenidos en ensayos con diferentes tipos de biochar (trigo y madera), por Dempster *et al.* (2012). Esta ausencia de cambios puede deberse a la baja cantidad de carbono lábil disponible en el biochar, que no proporcionó el sustrato necesario para el desarrollo y el crecimiento de los microorganismos, capaces de degradar ese carbono orgánico y de liberar el nitrógeno de forma eficiente.



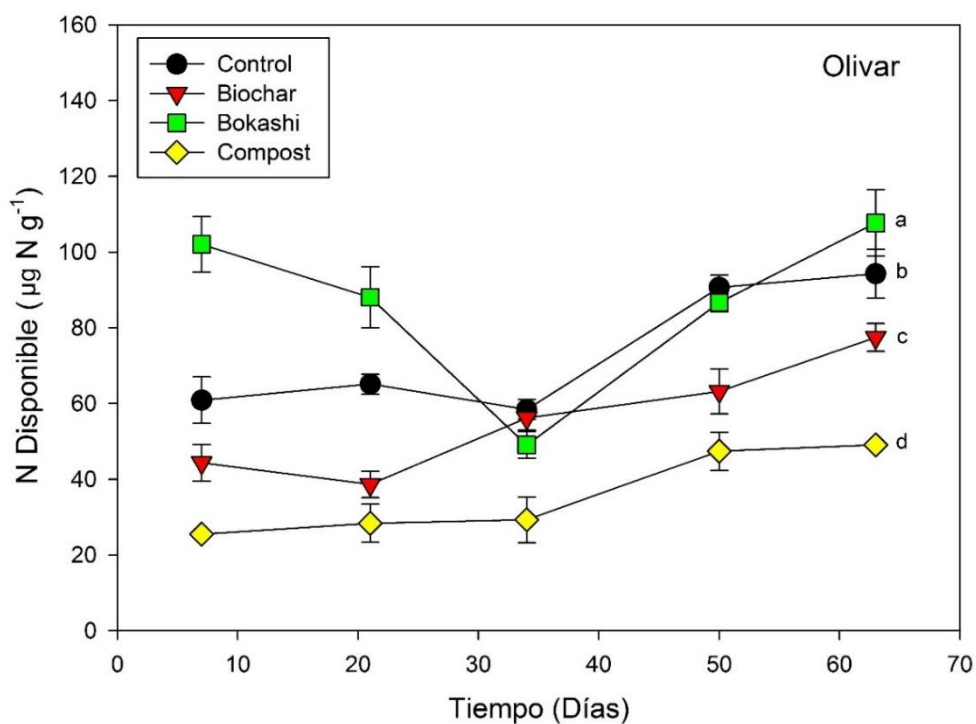
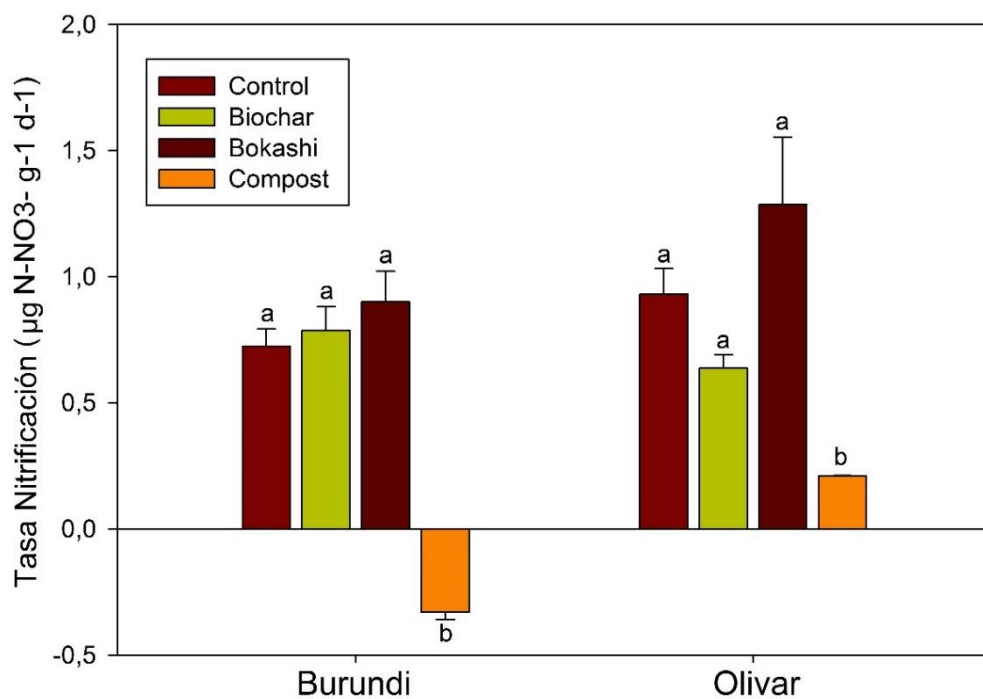


Figura 19. Dinámica de nitrógeno disponible en forma de Nitrato (NO_3) y Amonio (NH_4) en dos suelos con pH contrastado (media de 3 réplicas $\pm$ desviación estándar) a los que se adicionó, a excepción de uno que no recibió ningún aporte (Control), diferentes tipos de materia orgánica (Biochar, bokashi y compost). Las diferentes letras denotan diferencias significativas ($P < 0,05$)



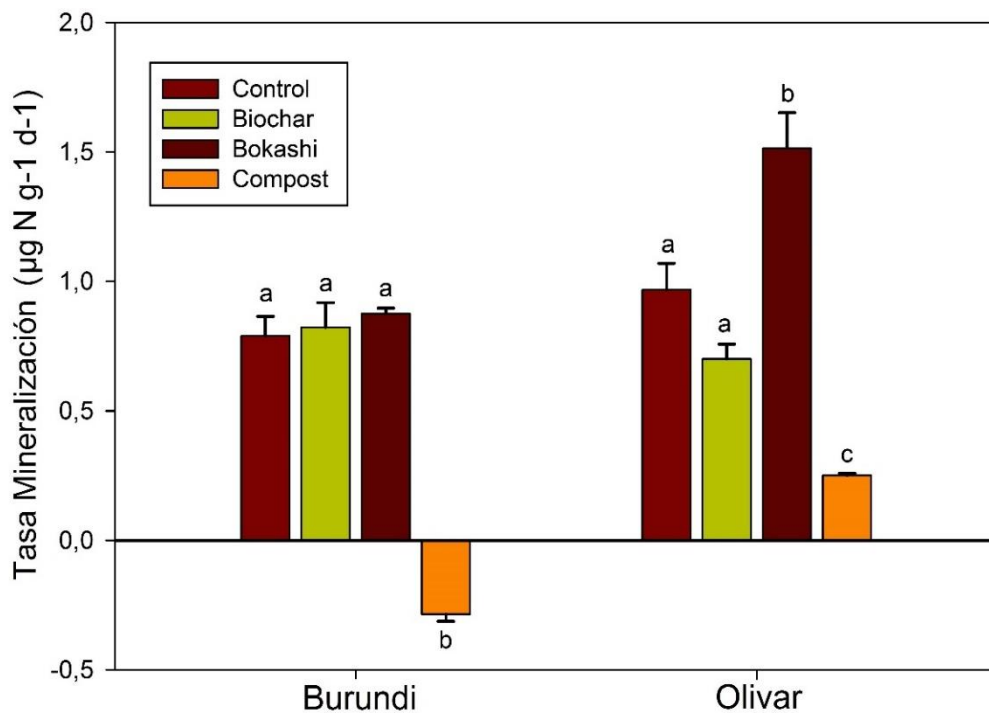


Figura 20. Tasa de mineralización ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) y tasas de nitrificación (valores medios $\pm$ desviación estándar) para dos suelos con condiciones de pH contrastado, enmendados con diferentes aportes de carbono orgánico (biochar, bokashi y compost). Las diferentes letras que se observan sobre cada barra denotan diferencias significativas ($P < 0,05$)

5. CONCLUSIONES

1. La calidad de las diferentes enmiendas fue significativamente diferente. El biochar es un material muy estable, es decir, la cantidad de carbono refractario que tiene es muy elevada. Por lo tanto, este material sería muy útil para almacenar C en el suelo a largo plazo de forma estable. Por otro lado, el bokashi y el compost, presentaron una actividad biológica más elevada, lo que indica que son materiales de más fácil descomposición y menos estables.
2. Ninguna de las enmiendas resulta fitotóxica para el desarrollo de vegetación, ya que los índices de germinación superaron el 100% en todos los casos. Los mejores resultados se obtuvieron para el Bokashi, con un 181% del IG.
3. Como se esperaba al inicio del ensayo, se obtuvieron diferencias significativas en la dinámica del carbono para ambos suelos. Por un lado, la producción acumulada fue mayor para las diferentes enmiendas en el suelo de olivar, en el cual se obtuvieron valores superiores que en el suelo de Burundi. La

producción de CO₂ para cada tipo de enmienda está fuertemente influenciada por el tipo de suelo. En el suelo de Burundi se obtuvieron resultados similares para el bokashi y el compost, en contraposición, los mejores resultados entre estas dos enmiendas para el suelo de olivar, se obtuvieron para el compost, con una diferencia de producción de carbono acumulado de 161,3 C-CO₂ g⁻¹ respecto al bokashi. Esto implica que el empleo de una enmienda orgánica debe estar sujeto a la tipología concreta de suelo que se esté utilizando, para conseguir unos resultados de producción agrícola óptimos en cada caso.

4. La aplicación de las enmiendas no tuvo ningún efecto significativo sobre la dinámica del nitrógeno inorgánico disponible en el suelo, a excepción del Bokashi, que obtuvo tasas de mineralización, de nitrificación y de nitrógeno disponible superiores a las del control. Además, se observaron diferencias significativas para este en el suelo de olivar, lo que indica que la liberación de nitrógeno del bokashi podría ser más eficiente en suelos con un pH básico.
5. Los valores más bajos para la mineralización y nitrificación neta se obtuvieron para el compost en ambos suelos, llegando incluso a ser negativo en el suelo de Burundi, lo que indica una inmovilización del nitrógeno.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, Y., Cayama, J., Gómez, N., Reyes, D., Rojas, García., 2006. Respiración microbiana y prueba de fitotoxicidad en el proceso de compostaje de una mezcla de residuos orgánicos. *Multiciencias* 6: 220-227.
- Anderson, J.P.E., 1982. Soil respiration, in: A.L. Page, R.H. Miller, D.R. Keeney (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2*, second ed., Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, pp. 831-871.
- Ayuso, M., Pascual, J.A., García, C., Hernández, T., 1996. Evaluation of urban wastes for agricultural use. *Soil Sci. Plant Nutr.* 42, 105-111.
- Bruun, S., Jensen, E.S., Jensen, L.S., 2008. Microbial mineralization and assimilation of black carbon; Dependency on degree of thermal alteration, *Org. Geochem* 39, 839-845.

- Cerrato, M.E., Leblanc, H.A., Kameko, C., 2007. Potencial de mineralización de nitrógeno de bokashi, compost y lombricompost producidos en la universidad Earth. *Tierra Tropical*, Costa Rica, 3: 183-197
- Corbeels, M., Hofman, G., Van Cleemput, O., 1999. Simulation of net N immobilization and mineralization in substrate-amended soils, by the NCSOIL computer model. *Biol. Fertil. Soils* 28: 422-430.
- Cronje, A., Turner, C., Williams, A., 2003. Composting under controlled conditions. *Environmental Technology*, Vol. 24, 1221-1234
- Dempster, D.N., Jones, D.L., Murphy, D.V., 2012. Organic nitrogen mineralization in two contrasting agro-ecosystems is unchanged by biochar addition, *Soil Biol. Biochem.* 48, 47-50.
- Escalante, A., Pérez, G., Hidalgo, C., López, J., Campo, J., Valtierra, E., Etchevers, J.D., 2016. Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra latinoamerica*, Vol.34, Chapingo.
- FAO and aecid (2011). Uso y elaboración del Bokashi. Programa especial para la seguridad alimentaria pesa en el Salvador. GCP/ELS/007/SPA.
- Gómez, B., García, Ruiz., Hinojosa, M.B., 2016. Management of tree pruning residues to improve soil organic carbon in olive groves. *European Journal of Soil Biology* 74, 104-113.
- Guerrero, P.L., Quintero, R., Espinoza, V., Benedicto, G.S., Sánchez, M.J., 2012. Respiración de CO₂ como indicador de la actividad microbiana en abonos orgánicos de lupinus. *Terra Latinoamericana*, Chapingo. Vol 30, núm. 4, pp 355-362.
- Gutiérrez, M.R., 2014. Efecto de la gestión de la poda de olivar en la acumulación de carbono orgánico en el suelo. Trabajo Fin de Grado. Universidad de Jaén, p.18.
- Hart, S.C., Stark, J.M., Davidson, E.A., Firestone, M.K., 1994. Nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification, in: C.A. Weaver, P. Bottomley

- (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Microbiological and Biochemical Properties*. Part 2, third ed., ASA and SSSA, Madison, pp. 985-1018.
- Hernández, O.A., Ojeda, D.L., López, J.C., Arras, A.M., 2010. Abonos orgánicos y su efecto en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. *Tecnociencia Chihuahua*, Vol. 4, núm. 1
- Jones, A., Breuning-Madsen, H., Brossard, M., Dampha, A., Deckers, J., Dewitte, O., Gallali, T., Hallett, S., Jones, R., Kilasara, M., Le Roux, P., Micheli, E., Montanarella, L., Spaargaren, O., Thiombiano, L., Van Ranst, E., Yemefack, M., Zougmore, R., (eds.) 2013. *Soil Atlas of Africa*. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg. 176 p.
- Keeney, D.R., Nelson, D.W., 1982. Nitrogen-inorganic forms, in: A.L. Page, R.H. Miller, D.R. Keeney, et al. (Eds.), *Methods of Soil Analysis*. Part 2, second ed., Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, pp. 643-698.
- Knoblauch, C., Maarifat, A.A., Pfeiffer, E.M., Haefele, M.S., 2010. Degradability of black carbon and its impact on trace gas fluxes and carbon turnover in paddy soils, *Soil Biol. Biochem.* 43, 1768-1778.
- Labrador, M.J., 2001. La materia orgánica en los agrosistemas. Grupo Mundi-Prensa. España. p 11-13, 124, 169-171.
- Lehmann, J. and Joseph, S., 2009. Biochar for environmental management. Science and technology. Earthscan. UK-USA.
- Lehmann, J., Czimczik, D., Laird, S., Sohi, S., 2009 Stability of biochar in the soil (Chapter 11), in: J. Lehmann, S. Joseph (Eds.), *Biochar for Environmental Management Science and Technology*, Earthscan, London, pp. p.83-205.
- Lehmann, J., da Silva, Jr. J. P., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., Glaser, B. 2003a. Nutrient availability and leaching in an archeological anthrosol and a ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant Soil*, 249, 343-57.

- Lehmann, J., Kern, D. C., Glaser, B., Woods, W.I., 2003b. In Lehmann, C.J., Kern, D.C., Glaser, B., Woods, W. I. (Eds.). *Amazonia Dark Earths: Origin, Properties, Management*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht. Schoeneberger, P.J., Wysocki, D.A., Benham, E.C., Broderson, W.D., 1998. *Field book for describing and sampling soils*. Natural Resources Conservation Service, USDA, National Soil Survey Center, Lincoln, NE, 128 p.
- Lerch, R.N., Barbarick, K.A., Sommers L.E., Westfall, D.G., 1992. Sewage sludge proteins as labile carbon and nitrogen sources. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 56, 1470-1476.
- Lichtinger, V., Székely, A., Fernández, A., Ríos, R., 2000. Indicadores para la evaluación del desempeño. *Reporte Ambiental 2000*. INEGI. p. 55-71
- MacLeod, M., Moran, V., Eory, R.M., Rees, A., Barnes, C.F.E., Topp, B., Ball, S., Hoad, E., Wall, A., McVittie, G., Pajot, R., Matthews, P., Smith, A., 2010. Developing greenhouse gas marginal abatement cost curves for agricultural emissions from crops and soils in the UK, *Agri. Syst.* 103, 198-209.
- Mingorance, M.D., Barahona, E., Fernández-Gálvez, J., 2007. Guidelines for improving organic carbon recovery by the wet oxidation method. *Chemosphere* 68, 409-413.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM) (Ministry of Environment and Rural and Marine affairs), *Anuario de Estadística. Secretaria General Técnica de Agricultura y Alimentación (Yearbook of Statistics. Technical Secretariat of Agriculture and Food)*, Gobierno de España (Government of Spain), 2014.
- Nguyen, B.T., Lehmann, B.T., Kinyangi, J.R., Smernik, S.J., Riha, M.H., 2009. Engelhard, Long-term black carbon dynamics in cultivated soil, *Biogeochem* 92, 163-217.
- Novara, A., Gristina, Y., Kuzyakov, C., Schillaci, V.A., Laudicina, T., 2013. La Mantia. Turnover and availability of soil organic carbon under different Mediterranean land-uses as estimated by ^{13}C natural abundance, *Eur. J. Soil Sci.* 64. 466-475.

- Palm, C.A., Rowland, A.P., 1997. A minimum data set for characterization of plant quality for decomposition, in: G. Cadisch, K.E. Giller (Eds.), *Driven by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition*, CAB International, Wallingford, pp. 379-392.
- Paniza, A., García, P., Sánchez, J.D., 2015. Análisis de la expansión del olivar en la provincia de Jaén a través de fuentes cartográficas (1956-2007). *Anales de Geografía*, Vol 35, núm 1, 119-137
- Pastor, M., Castro, J., Humades, M.D., Muñoz, J., 2000. *Sistemas de manejo del suelo en olivar de Andalucía*. Consejería de agricultura y pesca. Junta de Andalucía. Edafología, vol 8, pp. 75-98, 2001.
- SÁNCHEZ, J.D., 2012. Una contribución al debate sobre los monocultivos: la especialización olivarera de Andalucía (España). *GEO – UERJ*, 23, 19-52.
- Shintani, M., Leblac, H., Tabora, P., 2000. *Tecnología tradicional adaptada para una agricultura sostenible y un manejo de desechos modernos*. 1ª ed. Guácimo (CR): Universidad EARTH. Guía para uso práctico, 25 pp.
- Smith, J.L., Collins, H.P., Bailey, V.L., 2010. The effect of young biochar on soil respiration. *Soil Biology and Biochemistry*, 42: 2345-2347.
- Sohi, S.P., Krull, E., Lopez-Capel, E., Bol, R., A, 2010. Review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, vol.105 pp. 47-82.

REFERENCIAS WEB

- [1] <https://www.afdb.org/en/countries/east-africa/burundi/>
- [2] www.fao.org
- [3] www.afdb.org
- [4] www.cia.gov
- [5] <https://www.ifpri.org/node/2324>
- [6] <http://www.ine.es/>
- [7] <http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/que-es-el-cambio-climatico-y-como-nos-afecta/>
- [8] <https://es.greenpeace.org>

[9] <https://www.statgraphics.net/>

[10] www.statsoft.com