

Utilización de subproductos orgánicos vegetales para mejorar las propiedades físicas de suelos alterados.

Grado en Ciencias Ambientales Facultad de Ciencias Experimentales Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente Área de Edafología y Química Agrícola

2016/2017

Tutores: GÓMEZ LUCAS, IGNACIO Y NAVARRO PEDREÑO, JOSÉ

Autor: SHEILA MARTÍNEZ BERNABEU

Resumen

Se ha estudiado el efecto de la incorporación de dos subproductos orgánicos de procedencia vegetal (paja de heno y hoja de palmera), a dos suelos alterados (franco-arcilloso y franco-arcillo-arenoso), sobre diferentes propiedades físicas de los mismos: densidad aparente, densidad real, porosidad y conductividad hidráulica en saturación. Las dosis aplicadas, de cada residuo en los suelos, han sido: 0; 1,5; 3; 4,5 y 6 % (p/p). El uso de cantidades crecientes de los subproductos hace disminuir la densidad aparente y favorece el aumento de la porosidad y la conductividad hidráulica, en ambos suelos. La paja de heno produce mayores cambios que la hoja de palmera sobre las propiedades analizadas. Ambos residuos pueden ser utilizados como enmiendas o mejoradores físicos de suelos en agricultura sostenible.

Palabras clave: conductividad hidráulica saturada, densidad aparente, porosidad, suelos, paja de heno, hoja palmera.

Abstract

The effect of the incorporation of two organic by-products from plants (hay straw and palm leaf), on two altered soils (loamy-loamy and loamy-sandy loam) has been studied on different physical properties: bulk density, real density, porosity and hydraulic conductivity in saturation. The applied doses, of each residue in the soils, have been: 0; 1.5; 3; 4.5 and 6% (w / w). The use of increasing amounts of the by-products decreases the bulk density and favors the increase of porosity and hydraulic conductivity in both soils. Hay straw produces greater changes than the palm leaf on the properties analyzed. Both residues can be used as amendments or physical soil improvers in sustainable agriculture.

Keywords: saturated hydraulic conductivity, bulk density, porosity, hay straw, palm leaf.

ÍNDICE

	Páginas
<u>1. INTRODUCCIÓN</u>	3
1.1. Uso de residuos orgánicos como enmienda en el suelo en la UE.....	3
1.2. Importancia de los parámetros físicos del suelo.....	5
1.3. Conductividad hidráulica del suelo.....	9
<u>2. OBJETIVOS</u>	12
<u>3. MATERIALES Y MÉTODOS</u>	13
3.1. Localización del ensayo.....	13
3.2. Materiales utilizados en las diferentes fases.....	14
3.3. Método para determinar la conductividad hidráulica de los suelos....	19
3.4. Preparación de suelos y residuos.....	20
3.5. Caracterización de suelos.....	21
3.6. Caracterización de residuos.....	26
3.7. Tratamientos establecidos.....	26
3.8. Tratamiento estadístico.....	27
<u>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	28
4.1. Densidad real.....	28
4.2. Densidad aparente.....	29
4.3. Porosidad.....	30
4.4. Conductividad hidráulica saturada.....	31
<u>5. CONCLUSIONES</u>	34
<u>6. BIBLIOGRAFÍA</u>	35
6.1. Consultas en internet.....	37
<u>7. ANEXOS</u>	39
7.1. Figuras.....	39

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores problemas con los que se enfrenta la humanidad y a los que desde las Ciencias Ambientales se debe dar una solución adecuada es el debido a la producción y acumulación de residuos. El incremento continuo en su producción, la longevidad y persistencia de muchos de ellos como los plásticos, el inadecuado manejo y gestión, su incorporación a la cadena trófica y los graves efectos contaminantes son serios retos a los que debemos enfrentarnos. Esta situación se agrava con la inducción al cambio del clima producido por el hombre y las modificaciones en la composición de la atmósfera, de las aguas y de los suelos, capaces de afectar negativamente a las especies actuales y particularmente al hombre.

En esta línea de actuación se inscribe este trabajo, centrado en residuos orgánicos a los que se les pretende dar un uso e integración en el medio, favoreciendo su eliminación y creando condiciones favorables para nuestro entorno.

1.1. Uso de residuos orgánicos como enmienda en el suelo en la UE.

Según la Política Agrícola Común (PAC), es un ámbito de responsabilidad compartida entre la Unión Europea (UE) y los países de la UE fomentar la mejora de la productividad agrícola, de forma que los consumidores dispongan de un suministro estable de alimentos a precios asequibles, y garantizar que la UE disponga de un sector agrícola viable (art. 39 Tratado de Funcionamiento de la UE año 1962).

Transcurridos más de cincuenta años, la UE debe enfrentarse a nuevos retos:

- la seguridad alimentaria: a escala mundial, la producción de alimentos deberá duplicarse para alimentar a una población mundial prevista de 9700 millones de personas en 2050 (Khokhar y Kashiwase, 2017);
- el cambio climático y la gestión sostenible de los recursos naturales;
- la conservación del paisaje en toda la UE y el mantenimiento de una economía rural viva.

Haciendo mención a los nuevos objetivos de la PAC, el uso responsable de los recursos naturales es fundamental para la producción de alimentos y nuestra calidad de vida,

ahora y en el futuro. La nueva PAC apoya a los agricultores para garantizar la protección del medio ambiente y la biodiversidad.

Por lo tanto, la aplicación al suelo de enmiendas orgánicas derivadas de los materiales de origen urbano, agrícola, industrial o municipal (productos de desecho orgánico, en inglés *organic waste products*: OWP) pueden ser usados para mantener o incluso aumentar los niveles de carbono orgánico en el suelo (en inglés *soil organic carbon*: SOC) (Schils *et al.*, 2008). La aplicación al suelo de OWP se traduce directa e indirectamente en efectos agronómicos y ambientales (Marmo, 2008). Algunos de los efectos positivos están relacionados con el contenido de SOC y la mejora de la composición de carbono orgánico intercambiable en el suelo, como también en la mejora de la estabilidad de los agregados y la porosidad del suelo (Annabi *et al.*, 2011; Grosbellet *et al.*, 2011). Otros efectos se deben a la sustitución potencial de fertilizantes minerales a través de la incorporación de nutrientes tales como N, P, K proporcionados por OWP, evitando así los altos costes energéticos fósiles y por lo tanto el impacto sobre el calentamiento global debido a la producción y uso de fertilizantes sintéticos (Diacono y Montemurro, 2010). Por último, la aplicación de desechos orgánicos al suelo tiene un gran potencial de mitigación del cambio climático a través del secuestro del CO₂ atmosférico por los compuestos orgánicos del suelo (Lal, 2004). En Europa, en un futuro, el reciclaje de los compuestos orgánicos biodegradables se espera que aumente, por lo tanto, también se espera la disminución del depósito de estos en vertederos y la incineración sin recuperación de energía (European Commission, 2010). La aplicación al suelo de productos de desecho orgánico después de un tratamiento biológico (por ejemplo, el compostaje o la digestión anaerobia) puede ser la opción más ecológica para la gestión de los residuos.

Uno de los principales efectos medibles de la aplicación repetida en el suelo de OWP es el aumento de su porosidad del suelo y, por lo tanto, la disminución de la densidad aparente del suelo (Martin *et al.*, 2009; Schjønning y Thomsen, 2013). También se espera que sea beneficioso para las labores de labranza del suelo, disminuyendo así la fuerza de tiro y en consecuencia, una posible disminución de combustible del tractor (Watts *et al.*, 2006). La energía ahorrada debido a la menor resistencia que ofrece el suelo al ser labrado si aplicamos residuos, está siendo ignorada de los tratamientos de residuos que implican la aplicación al suelo de éste en las evaluaciones ambientales.

Sin embargo, la reducción de las emisiones de efecto invernadero puede ser importante.

1.2. Importancia de los parámetros físicos del suelo.

El proceso de producción agrícola es un sistema de múltiples variables en continua interacción espacial y temporal. En este sistema llamado continuo suelo-planta-atmósfera cada propiedad no es un hecho aislado, sino que constituye una función de la planta, el suelo y del clima en forma conjunta.

La cantidad y tasa de absorción de agua y nutrientes por las plantas depende de la habilidad de las raíces para absorber la solución del suelo que está en contacto con ellas, como así también de la habilidad que tiene el suelo de suministrar y transmitirla hacia las raíces a una velocidad tal que permita satisfacer los requerimientos de transpiración y crecimiento.

Cualquier factor adverso que altere el crecimiento y actividad de las raíces, puede afectar parcial o severamente la actividad radical y por lo tanto la capacidad de producción del cultivo, del mismo modo que algunas propiedades del suelo, tales como una baja conductividad hidráulica, que puedan limitar el libre suministro de agua y oxígeno a las raíces.

Por ello, las propiedades físicas del suelo son de vital importancia para la producción agrícola y el uso sostenible del recurso suelo. De todas ellas, destaca la estructura del suelo, que ejerce una influencia importante sobre las condiciones edáficas y el medio ambiente. A menudo se expresa como el grado de estabilidad de los agregados, resultado de la reordenación, floculación y cementación de las partículas.

La estructura del suelo se sabe que es de suma importancia en la productividad del suelo y un factor limitante del rendimiento del cultivo (Low, 1973; Allison, 1973). A pesar de que la materia orgánica ha sido claramente identificada como uno de los componentes clave de la estabilidad estructural del suelo, en los suelos agrícolas se está agotando progresivamente por el cultivo intensivo, sin un rendimiento adecuado de la biomasa vegetal. La pérdida de la estructura del suelo se ve cada vez más como una forma de degradación del mismo (Chan *et al.*, 2003) y está relacionada con las actividades que se llevan a cabo en el suelo y por el cultivo.

Una manera posible de entender la complejidad estructural de los suelos y su relación con la materia orgánica es centrarnos en el sistema poroso, en donde se cumplen todos los procesos físicos, químicos y biológicos. El sistema poroso del suelo afecta directamente sobre el balance de agua (entradas y salidas del sistema), en el funcionamiento hídrico (relaciones agua-planta), en la entrada y difusión de gases y de calor, así como en el desarrollo y crecimiento de las raíces.

De todas las propiedades del suelo, la porosidad es tal vez la más fácil, frecuente y ampliamente alterada por las operaciones de labranza o manejo sin laboreo. De estos supuestos se desprende entonces, que el conocimiento del funcionamiento estructural del suelo, con sus variaciones propias y aquellas modificadas por el hombre, permitiría obtener mayor rendimiento y aumentar la eficiencia de uso de recursos.

La relación entre la capacidad de almacenaje y el movimiento del agua en los suelos con la porosidad es evidente y fundamental. Sin embargo, no es solamente la cantidad total de poros en el sólido lo que define el comportamiento hídrico del suelo, sino también y en muchos casos de manera predominante, las características específicas del poro, en términos de forma, tamaño y distribución.

Desde el punto de vista agronómico, la distribución de tamaño no solo incide sobre la cantidad de agua que puede retener el suelo, sino que regula la energía con que la misma está retenida, el movimiento hacia la planta, hacia la atmósfera y hacia otras zonas del suelo; procesos todos regulados por diferencias de estados de energía.

El movimiento del agua en el suelo en relación a las características del espacio poroso está basado en una generalización de la Ley de Darcy, deducida para la circulación en un medio poroso, que expresa que " la velocidad de circulación de agua en un medio poroso saturado, es directamente proporcional a la diferencia de presión hidráulica entre dos puntos y a la conductividad del suelo al agua, e inversamente a la distancia entre los dos puntos".

Este principio es aplicable tanto a flujos saturados como insaturados, sí bien en suelos no saturados, la conductividad depende mucho del potencial mátrico o matricial existente (asociado a la tendencia del agua de fluir desde un lugar a otro debido básicamente a ósmosis, gravedad, presión mecánica, o tensión superficial), y del tipo de suelo.

El movimiento del agua a través del interior del perfil del suelo, es dominado por las características de dicho sistema poroso. El flujo de agua es gobernado por un factor hidráulico, un factor gravitacional y un factor de capilaridad del suelo. En un suelo no saturado el movimiento del agua está dado por la conductividad hidráulica y la sortividad.

Como el agua solo se trasmite a través de los poros, el flujo que circula será proporcional al diámetro de los poros, disminuyendo conforme los diámetros se reducen, pero esta disminución de velocidad, aparte del efecto geométrico, es aun en mayor grado para los pequeños poros, debido a que la movilidad de las moléculas de agua unidas a las partículas sólidas, es muy baja por los efectos de adsorción (sortividad). Conforme el contenido de humedad baja, disminuye el potencial mátrico y la conductividad tiende a disminuir con mayor rapidez.

En condiciones de saturación (o casi saturación), los suelos de textura gruesa presentan una mayor conductividad, como consecuencia del mayor tamaño de sus poros, que permiten una más fácil transmisión del agua. Sin embargo, a potenciales mátricos bajos, las mayores conductividades se logran en suelos de texturas finas, ya que poseen una sección efectiva de transmisión en esas condiciones, superior a los suelos de textura gruesa.

La cantidad total de agua que entra en un suelo, es mayor cuando el suelo se encuentra inicialmente seco que cuando está húmedo; no obstante, la velocidad de avance del agua (conductividad hidráulica) a lo largo del perfil del suelo, es inferior en el caso de suelo seco.

Otra propiedad física del suelo y no menos importante que la estructura, es la densidad. La densidad aparente del suelo se define como, la relación entre la masa de la muestra de suelo seca y el volumen aparente de la muestra in situ. Los valores tanto de la densidad aparente y real son necesarios para calcular la porosidad del suelo (Blake y Hartge, 1986).

Esta propiedad física es dinámica y varía dependiendo de las condiciones estructurales edáficas. También puede ser modificada por la biota del suelo, la vegetación y las prácticas mecánicas, pisoteo por el ganado, maquinaria agrícola, clima y estación del año, etc. (Arshad *et al.*, 1996; Hu *et al.*, 2012).

La densidad aparente es un parámetro esencial en muchos cálculos y modelos, y particularmente es un predictor para estimar la conductividad hidráulica (K_h). Sin embargo, la densidad aparente no se determina habitualmente por la dificultad que tiene y se han hecho muchos intentos para predecirlo a partir de otras variables más fácil y rutinariamente medibles, ya que la medición directa de la densidad aparente del suelo se considera laboriosa, requiere mucho tiempo, es tediosa, costosa y difícil de lograr en algunos suelos. Como confirmación, Drew (1973) observó que la medición de esta propiedad se evita en muchos estudios en los que debe incluirse.

En el presente estudio la densidad aparente de los suelos alterados se obtiene en el laboratorio con la ayuda de un cilindro, sin compresión; y respecto a la de los residuos se obtiene según las directrices de la norma UNE-EN 13040, mediante compresión de una masa conocida.

La densidad aparente es un indicador importante de la calidad, la productividad, la compactación y la porosidad del suelo. La compactación del suelo se estudia debido a sus efectos en varias cuestiones agrícolas, incluyendo los rendimientos de los cultivos y la reducción de la calidad (Batey, 2009). El carbono orgánico del suelo (SOC) se ha vuelto cada vez más importante en el contexto de los estudios climáticos debido a que el secuestro de carbono y su liberación de los depósitos de carbono del suelo pueden influir en el calentamiento global (Batjes, 1998).

Por otro lado, los agregados son partículas secundarias formadas por la combinación de partículas minerales, sustancias orgánicas e inorgánicas. La compleja dinámica de agregación es el resultado de la interacción de muchos factores que incluyen el medio ambiente, los factores de manejo del suelo tales como la composición mineral, la textura, la concentración de SOC, los procesos pedogenéticos, las actividades microbianas, los iones intercambiables, las reservas de nutrientes, y la disponibilidad de humedad (Kay, 1998).

1.3. Conductividad hidráulica del suelo.

Una de las propiedades más directamente relacionadas con la estructura y el movimiento de agua en el suelo es la conductividad hidráulica, como se deduce de lo anteriormente expuesto. Por ello, este estudio se centrará en conocer el comportamiento y el valor de esta propiedad cuando se producen variaciones en las adiciones de enmiendas orgánicas al medio edáfico.

La herramienta a utilizar es un permeámetro de carga constante, a continuación, se muestra en la figura 1 un esquema del ensayo.

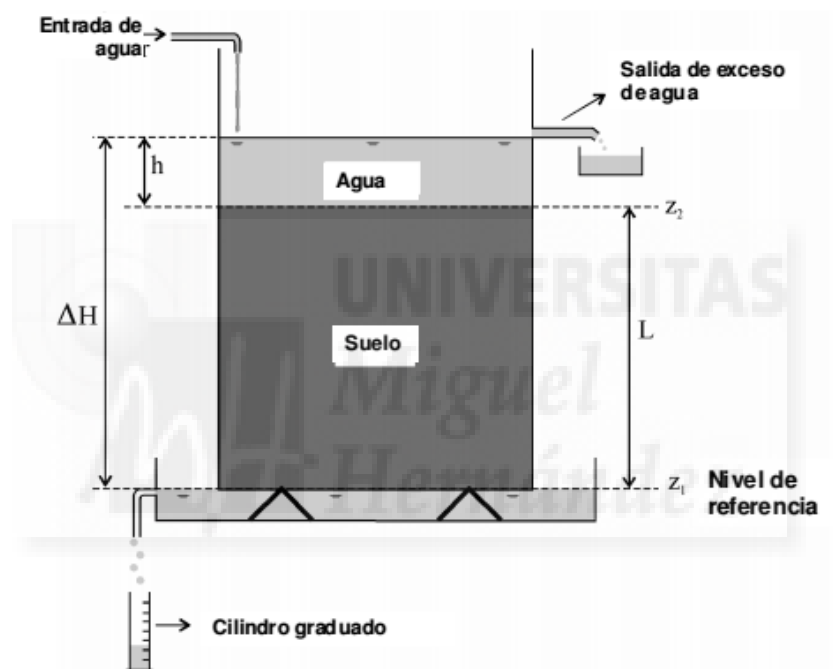


Figura 1: Permeámetro de carga constante (Hartmann, 2000).

Para calcular la conductividad hidráulica saturada de la mezcla se puede utilizar la siguiente expresión:

$$K_{hs} = \frac{V}{A \cdot \Delta t \cdot \left[\frac{h+L}{L} \right]}$$

Dónde:

K_{hs} = conductividad hidráulica saturada (cm h^{-1}).

h = carga de agua que se mantiene constante por encima por encima del nivel superior del cilindro de suelo (cm).

L = altura del cilindro de suelo (cm).

Δt = tiempo transcurrido desde que comenzó a recogerse el agua percolada hasta la medición final del volumen (V) de estas (horas).

V = volumen de agua recogido en el cilindro graduado (cc).

A = área de la sección circular horizontal del cilindro (cm^2).

En la agricultura de secano de ambientes áridos y semiáridos la capacidad del suelo para almacenar agua juega un papel importante en el éxito de los cultivos. La infiltración y la evaporación son los procesos más importantes que determinan el almacenamiento de agua en el suelo. Las condiciones de la superficie juegan un papel importante en la determinación de las tasas de infiltración y evaporación del agua en el suelo. La labranza es la forma más eficaz para modificar las características de la superficie del suelo debido a su efecto sobre el espacio poroso (forma, volumen y continuidad de los poros).

La rugosidad de la superficie del suelo es otra propiedad del suelo que influye en el equilibrio del agua, ya que aumenta la capacidad de almacenamiento en las depresiones del suelo (Mwendera y Feyen, 1993; Hansen *et al.*, 1999). En los suelos agrícolas, la rugosidad de la superficie se ve influenciada por la labranza, vegetación, tipo de suelo y la intensidad de la lluvia (Hansen *et al.*, 1999).

La utilización de residuos como cobertura en superficie se ha demostrado eficaz para reducir la evaporación del agua respecto al suelo desnudo, lo que se traduce en una mayor disponibilidad potencial de agua para las plantas (Rico Hernández, 2016). Esta reducción es debida al aislamiento del suelo de los rayos solares y la temperatura del aire y, el aumento de la resistencia al flujo de vapor de agua mediante la reducción de la velocidad del viento (Smika y Unger, 1986; Blevins y Frye, 1993).

Sin embargo, también es necesario determinar la influencia en el movimiento del agua en el perfil del suelo, en este caso en la capa arable que es determinante del buen

funcionamiento de los suelos agrícolas. Por tanto, la determinación de la conductividad hidráulica se convierte en información muy relevante para predecir el adecuado comportamiento del agua frente a la infiltración y la capacidad de almacenamiento o pérdida por parte del suelo.

Se sabe que el movimiento de agua en los suelos ocurre tanto en sentido vertical como horizontal, dependiendo de las condiciones de humedad. En condiciones saturadas, las cuales se presentan por debajo del nivel freático, el movimiento es predominantemente horizontal y en menor proporción en sentido vertical. En condiciones de no saturación, cuando los poros grandes están llenos de aire, el flujo es preferentemente vertical.



2. OBJETIVOS

La finalidad de este trabajo fin de grado es la de evaluar cómo afecta a propiedades físicas como la densidad, la porosidad y la conductividad hidráulica del suelo la utilización de residuos orgánicos como paja de heno, habitual en estrategias agrícolas como el acolchado de suelos, y hoja de palmera triturada.

Concretamente, en este estudio se determinarán las modificaciones en estas propiedades físicas tan relevantes, utilizando dos suelos alterados, similares a los que se encuentran en el horizonte superficial, la capa arable, de suelos agrícolas. Ambos presentan características diferentes, especialmente su textura.

Para alcanzar esta finalidad, se realizarán los siguientes objetivos específicos:

- Revisión bibliográfica sobre el tema.
- Caracterización de los suelos a utilizar en este estudio.
- Preparación y determinación de las propiedades de los residuos orgánicos siguiendo la normativa establecida a tal efecto.
- Preparación de mezclas de suelos con el residuo orgánico añadido en distintas proporciones.
- Someter a experimentación las distintas mezclas para determinar las propiedades físicas y comprobar si existen diferencias significativas.
- Analizar las propiedades que pudieran ayudar a explicar el comportamiento detectado, considerando especialmente interesantes la densidad aparente, la densidad real y la porosidad de cada mezcla, entre otros parámetros.
- Elaborar los resultados y las conclusiones.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En este ensayo se determinarán diversas propiedades del suelo, densidad aparente, densidad real, la porosidad y fundamentalmente la conductividad hidráulica en condiciones de saturación del suelo en el laboratorio, objetivo principal de este estudio.

3.1. Localización del ensayo.

Parte del trabajo de investigación se ha realizado en el invernadero de la UMH. Dado su espacio en el interior y estar aislado de los factores climáticos externos, se han podido preparar los dos suelos, en los siguientes apartados se detallará, para después pasar a utilizarlos en el laboratorio del edificio Alcudia de la Universidad Miguel Hernández de Elche. Se utilizan capazos para depositar los suelos preparados y tapados, se almacenan en el invernadero, listos para ser utilizados en el laboratorio.

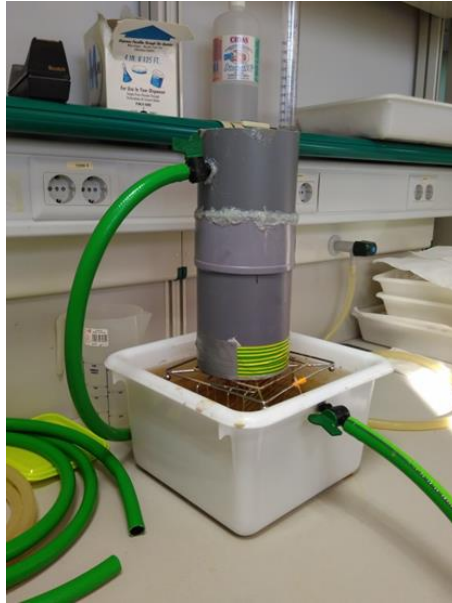
En el laboratorio se prepara el dispositivo para la determinación de la conductividad hidráulica del suelo (tratamientos de suelo y residuo) (fotografías 1 y 2) y proceder con los ensayos en el permeámetro construido a tal efecto (fotografía 3).



Fotografía 1: Tubos y tela (filtros).



Fotografía 2: Filtros con suelo preparado.



Fotografía 3: Permeámetro.

3.2. Materiales utilizados en las diferentes fases.

Se van a describir en este apartado las características principales de los materiales usados en la experimentación: 1) materiales de la fase de preparación del suelo, 2) preparación de cilindros para la toma de medidas, 3) suelos y 4) residuos orgánicos.

1) Materiales de la fase de preparación del suelo

- Pala, sacos y capazos. Utilizados para recoger los suelos de las diferentes zonas y depositarlos en sacos, para transportar y almacenar para los ensayos del trabajo.
- Cedazo. Con una luz de malla cuadrada de 0,5 cm de lado, utilizado para tamizar el suelo y evitar los fragmentos grandes o materiales no deseados en las muestras.
- Mazo. Para disgregar los agregados del suelo con un tamaño mayor al del cedazo utilizado.
- Lámina de plástico. Con un tamaño aproximado de 4 m², necesario para depositar los suelos una vez tamizados y homogeneizarlos, necesariamente limpio y seco para después almacenarlos en los capazos. Utilizada también, para cubrir los capazos de suelo preparado almacenado en el invernadero de la UMH y que no se pudiera humedecer ni depositar nada.

2) Preparación de cilindros para la toma de medidas.

- Cilindro PVC. Se utilizaron alrededor de 110 filtros hechos con cilindros de PVC de una altura de 16,2 cm y un diámetro 11,5 cm, cuadrados de tela con tamaño suficiente para que envolviera un área del cilindro. Sujetando la tela al cilindro, primero con cinta aislante y, en segundo lugar, con cinta adhesiva.
- Tejido de tela. Hace de filtro en el cilindro de PVC.
- Permeámetro. Aparato que consta de un cilindro de PVC de diámetro 11,5 cm y altura 16,2 cm, a una altura de 10,5 cm de la base se le realiza una perforación y se le coloca una llave de paso para colocar una manguera de desagüe de 125 cm, sellando con silicona a este cilindro en el otro extremo, otro cilindro de diámetro 12,5 cm. La utilidad de la incorporación del cilindro de mayor diámetro es para que encajen los filtros que contienen el suelo. Este aparato se coloca encima de una rejilla, unas gradillas y una tapadera grande de bidón (Fotografía 4), todo esto en el interior de una cubeta (Fotografía 5) a la que se le ha colocado otra llave de paso a una altura de 13,5 cm y una manguera de 98 cm para adición de agua.



Fotografía 4: Cilindro superior, rejilla, gradillas y tapa.



Fotografía 5: Cubeta, rejilla, gradillas y tapa.



Fotografía 6: Cubeta.

- Cubeta. Recipiente de altura 16,5 cm y desagüe a una altura de 13,5 cm con manguera de 98 cm, utilizada para recoger el agua filtrada del permeámetro e irá desaguando por gravedad a un cubo colocado en la parte inferior.
- Mangueras. Utilizadas dos mangueras para el agua la que vertemos por el extremo superior del permeámetro como la que se recoge en el desagüe de la cubeta.
- Silicona. Para adherir en el permeámetro el cilindro de mayor diámetro al de menor diámetro y las llaves de paso al cilindro superior del permeámetro y a la cubeta.
- Llave de paso. Se colocan para introducir las mangueras de desagüe.
- Rejilla, gradillas y tapadera grande de bidón. Soporte del permeámetro dentro de la cubeta, le proporciona altura al filtro.
- Cubo. Servía para desaguar la cubeta y poder recoger una vez estabilizado el fluido de entrada por la parte superior del filtro y el desagüe de la cubeta.
- Probeta 100 ml. Recoge un volumen de 100 ml por el desagüe inferior una vez se estabiliza el agua filtrada y la cubeta. Estos 100 ml son cronometrados.
- Bandejas. En ellas se homogeniza el suelo y el residuo antes de depositarlo en el filtro. En otras más grandes se vierte agua y se colocan los filtros con suelo 24-48 horas para que por capilaridad el agua ascienda a la superficie del cilindro y desplace el aire de los poros del suelo.
- Balanzas. Modelo HGS-15K, con sensibilidad 0,5g, para anotar el peso de los cilindros de PVC y el del suelo que se vierte en ellos; modelo PS 360/C/1, con sensibilidad 0,001 g, para pesar el volumen de agua desaguado recogido en el matraz de 100 ml.

- Cronómetro digital. Necesario para medir el tiempo que tarda el agua en llenar la probeta de 100 ml.

3) Suelos.

Los suelos utilizados en este experimento son:

- Suelo 1. Franco-arcilloso-arenoso.
- Suelo 2. Franco-arcilloso.

Más adelante se dedica un apartado destinado a describir las características de estos suelos con mayor grado de detalle.

4) Residuos orgánicos.

Los residuos orgánicos utilizados en el ensayo, tanto la palmera como la paja no han sido sometidos a ningún tratamiento biológico, solo un acondicionamiento físico:

- Hoja de palmera triturada (fotografía 7). Este residuo, muy común en nuestro entorno por la poda de las palmeras, especie (*Phoenix dactylifera*) muy fácil de conseguir. Con respecto al tamaño de los fragmentos, se ha cogido una muestra al azar de 100 trozos (fotografía 8), se ha obtenido una longitud de $4,5 \pm 0,1$ cm, un ancho de $0,18 \pm 0,05$ cm y un peso de $0,0266 \pm 0,0001$ g. Antes de proceder con la muestra de 100 fragmentos y los ensayos, se eliminaron los fragmentos más anchos y largos del residuo para evitar posibles errores debido a un exceso en la heterogeneidad del material procedente del triturado.
- Paja. Se ha utilizado paja de cereal (heno), la longitud de la paja era mayor a la que se podía introducir conjunto al suelo en los filtros, por lo tanto, se partió para que cupiera (fotografía 9), con una muestra representativa de 100 fragmentos (fotografía 10) se ha obtenido una longitud de $9,0 \pm 0,1$ cm, un diámetro de $0,28 \pm 0,05$ cm y un peso de $0,069 \pm 0,001$ g.



Fotografía 7: Residuo de palmera triturado.



Fotografía 8: Muestra de 100 fragmentos de palmera.



Fotografía 9: Residuo de paja fragmentado.



Fotografía 10: Muestra de 100 fragmentos de paja.

3.3. Método para determinar la conductividad hidráulica de los suelos.

Para medir los parámetros hidráulicos del agua en los suelos existen dos métodos, en el laboratorio mediante aparatos llamados permeámetros, tanto de carga constante como de carga variable y, los métodos de campo que permiten medir la conductividad hidráulica de un suelo de forma directa.

En este trabajo se ha llevado a cabo la experiencia en el laboratorio mediante un permeámetro diseñado por Ignacio Gómez y José Rico, con los materiales mencionados en el punto 3.2.

Como ya sabemos, la conductividad hidráulica (K_h) es la propiedad del suelo que describe la facilidad con la cual los poros del suelo permiten el flujo de agua. Cuando el suelo se satura, todos los poros pueden llevar agua y la conductividad está en su máxima expresión y es representada como K_{hs} .

Existe una relación cuantitativa entre la conductividad hidráulica y el volumen de agua en un suelo que cuente con un alto porcentaje de partículas grandes como, por ejemplo, las arenas. Las cuales permiten el paso del agua rápidamente, y los suelos que presentan un alto porcentaje de partículas pequeñas, como las arcillas, las cuales hacen que el paso del agua sea más lento.

- **Método carga constante de agua.**

Consiste en utilizar los cilindros de suelo y suelo más residuo, preparados en el laboratorio y previamente saturados por capilaridad. Para ello los cilindros que contendrán el suelo seleccionado y el residuo, se dejan entre 24 y 48 horas sumergidos parcialmente en agua en una bandeja. El agua debe cubrir lo suficiente al cilindro, un poco menos de $1/3$ aproximadamente, para asegurarnos que por capilaridad el agua asciende por los poros hasta la superficie libre del cilindro desplazando al aire, hay que tener en cuenta también las pérdidas por evaporación al añadir el agua.

Posteriormente, se colocan en el permeámetro sobre los que se mantiene una carga constante de agua, midiéndose el volumen de agua percolada a través de ellos en un tiempo determinado. Se esperará hasta recoger cerca de 100 ml, anotando el volumen exacto y el tiempo requerido para ello (fotografía 11).



Fotografía 11: Permeámetro real utilizado en el ensayo.

3.4. Preparación de suelos y residuos.

Se ha procedido a tamizar los dos suelos con un cedazo de 0,5 cm de luz de malla, extendiéndolos sobre una lámina de plástico. Una vez cribados en su totalidad, se ha mezclado cada uno de ellos por separado, para lograr una correcta homogeneización de los suelos, dejándolos extendidos unos días para que perdieran toda el agua por evaporación. De esta manera conseguimos eliminar las gravas y otros restos gruesos que podrían generar canales preferentes de percolación y, por tanto, los resultados que se obtuvieran no podrían asociarse a los residuos sino a la existencia de vías de transmisión de agua que cambiarían los resultados de la conductividad hidráulica.

Los dos residuos utilizados se colocaron por separado en bandejas, para seleccionar los trozos homogéneos para la experimentación (fotografía 12 y 13). Se sigue la misma estrategia que con los suelos, para poder utilizar un material que tenga unas características definidas y conocidas a priori.



Fotografía 12: Fragmentos eliminados del residuo de palmera.



Fotografía 13: Residuo de paja por fragmentar.

Las hojas de palmera proceden de las podas que se hacen en la universidad, utilizando la trituradora ubicada en el invernadero se han podido fragmentar para poder ser utilizadas en el ensayo.

La paja de heno utilizada, al tener casi siempre una longitud mayor a la que puede albergar el filtro, se ha procedido a cortar con unas tijeras para adecuar su tamaño con el de la palmera, y para que al preparar los filtros con el suelo y la paja esta no saliera en exceso del cilindro.

3.5. Caracterización de suelos.

La finalidad de analizar diversos parámetros físico-químicos permite conocer el tipo de suelo. A la hora de la caracterización y análisis de los suelos, se ha seguido el protocolo estandarizado utilizado en los laboratorios del Departamento de Agroquímica y Medioambiente, basado en las normas internacionales UNE y del MAPA

Lo primero que se hizo fue poner a secar la muestra de suelo en una zona seca y aireada a temperatura ambiente. Una vez seco, se tamizó la muestra con una luz de malla de 0,2 mm y se recogió en una bolsa de plástico, iniciándose los análisis a partir de ese momento. Para minimizar el error experimental se analizó por triplicado la muestra.

A continuación, se exponen los análisis realizados y la metodología utilizada:

- pH. Se mide en un pH-metro previamente calibrado mediante patrones estandarizados, una suspensión de suelo/agua en proporción 1:2.5 (p/V) (MAPA, 1986).
- Conductividad eléctrica (CE). Se mide en el conductímetro, previamente calibrado mediante patrones estandarizados de disoluciones de KCl, de conductividades conocidas, en extracto suelo/agua en proporción 1:5 (p/V), siguiendo el proceso establecido en la norma UNE 77308:2001. Calidad del suelo. Determinación de la conductividad eléctrica específica.
- Textura. Determinación mediante un densímetro Bouyoucos, que se basa en que la densidad de una suspensión depende de la cantidad suspendida, pudiendo evaluar las variaciones de esa densidad respecto al tiempo y relacionarla con la velocidad de suspensión y el tamaño de las partículas suspendidas (MAPA, 1986). Primero, se deben dispersar los agregados de las partículas destruyendo la materia orgánica del suelo, lo que se consigue al añadir hexametáfosfato sódico y elevando el pH con carbonato sódico. Posteriormente se miden las temperaturas y densidades a los 40 segundos (arcilla y limo) y a las 2 horas (arcilla). Por diferencia, se calcula el contenido en arena. Estos porcentajes se cruzan en el diagrama triangular para determinar la textura, según la clasificación USDA (United States Department of Agriculture) (Ver anexo 7.1, figura 2).
- Materia orgánica y contenido de carbono. La determinación de materia orgánica se basa en la utilización de dicromato potásico en medio sulfúrico como oxidante, valorando el exceso del ácido con sulfato ferroso amónico (sal de Mohr). El carbono orgánico oxidable se determina por retroceso o diferencia entre el dicromato utilizado y el valorado con sal de Mohr. El contenido de materia orgánica se obtiene indirectamente mediante la consideración de que el 58% de la materia orgánica del suelo es carbono (MAPA, 1986).
- Nitrógeno. Utilizando el método Kjeldahl, para determinar el Nitrógeno total, transformando el N orgánico en N amoniacal y valorando este con ácido clorhídrico (HCl), mediante los procesos de: digestión de la muestra, por vía

húmeda en medio sulfúrico; destilación del ion amonio en medio alcalino; y posterior valoración, factorizando con ácido clorhídrico de normalidad conocida (MAPA, 1986).

- Relación C/N. Una vez determinado el contenido de carbono y nitrógeno, se obtiene esta relación entre ambos.
- Fósforo. Para determinar el fósforo asimilable en el suelo, utilizamos para extraerlo el método de Burriel y Hernando, metodología muy recomendada por su sensibilidad en suelos calizos con pH alcalinos (1/20 en p/V), se forma un compuesto que es reducido en presencia de ácido ascórbico, determinando la concentración por colorimetría en el espectrofotómetro visible-UV a una longitud de onda de 825 nm (Díez, 1982).
- Carbonatos. El contenido en carbonato cálcico equivalente, se ha determinado según la norma UNE-77317, mediante el calcímetro de Bernard. Este método se basa en la reacción de ácido clorhídrico (HCl) al entrar en contacto con el carbonato cálcico (CaCO_3). De la reacción se desprende dióxido de carbono (CO_2), que será lo que utilizemos para valorar la cantidad de carbonatos equivalentes que hay en la muestra, ya que, en condiciones de presión y temperatura constante, el volumen de dióxido de carbono producido es proporcional al contenido de carbonatos de la muestra.
- Cationes de cambio (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}). Para conocer la concentración de estos macronutrientes, se realiza una extracción con acetato amónico y tras el filtrado, se determinan mediante espectrometría de absorción atómica con llama de nitroso/acetileno para Ca y llama de acetileno/aire para el Mg y espectrometría de emisión atómica con llama de acetileno/aire para Na y K (MAPA, 1986). Si se prevé que las concentraciones de macronutrientes sean altas, se prepararán diluciones previas.
- Micronutrientes (Cu, Fe, Mn y Zn). Para determinar la concentración de estos micronutrientes, se extraen con DTPA 0,005 N y tras 2 h de agitación y posterior filtrado, siguiendo lo especificado en la norma UNE-77315, los contenidos disponibles de los metales se determinan mediante espectrometría de absorción atómica con llama de acetileno/aire.

Tras realizar los análisis, se obtienen los resultados expuestos en la tabla 1:

Tabla 1: Características de los suelos utilizados en este experimento.

	Suelo 1	Suelo 2
Arcilla (%)	24	31
Limo (%)	20	27
Arena (%)	56	42
Textura	Franco-arcillo-arenoso	Franco arcilloso
pH	8,7	8,86
Na (mg/kg)	86	96
K (mg/kg)	139	36
Ca (mg/kg)	4606	5235
Mg (mg/kg)	184	198
Cu (ppm)	0,34	0,4
Fe (ppm)	1,6	1,23
Mn (ppm)	0,95	0,38
Zn (ppm)	0,23	0,22
CE (mS/cm)	0,125	0,163
Caliza activa (%)	12	15
M.O. ox. (%)	1,13	0,14
Carbonatos (%)	24	61
N Kjeldahl (%)	0,051	0,007
P (mg/kg)	4,9	0,2
Relación C/N	12,9	11.6

Según los resultados obtenidos en la caracterización de los suelos, desde el punto de vista agronómica las texturas son diferentes, textura franco-arcillo-arenosa y textura franco arcillosa. Este segundo suelo es más pesado, en cuanto a este parámetro.

Ambos muestran un pH básico, y contenido de salinidad medio, con escasa presencia de materia orgánica y bajo contenido en nitrógeno. La naturaleza caliza de ambos suelos queda reflejada en el elevado porcentaje de carbonato cálcico equivalente, aunque destaca sobremanera el suelo 2.

Además de estas propiedades, se determinaron, por su importancia para la conductividad hidráulica, mediante el uso de un cilindro rígido de dimensiones conocidas, las siguientes propiedades físicas del suelo, la densidad aparente y real, la porosidad.

Tabla 2: Densidad aparente y real de los suelos utilizados (suelo 1 y 2).

	SUELO 1	SUELO 2
Densidad real (kg/m ³)	2125	2210
Densidad aparente (kg/m ³)	1433	1580
Porosidad (%)	44,1	38,3

- Densidad aparente (da): Obtenida a partir de la relación peso/volumen de las muestras de suelo preparadas previamente utilizando un cilindro de volumen conocido. Esta densidad es una densidad aparente de las muestras alteradas mediante los métodos de preparación previos. Esta densidad nos da información clara sobre la porosidad del medio edáfico en su estado sin aplicación de los residuos, considerando la materia sólida y la porosidad.
- Densidad real (dr): la densidad real de los suelos la calculamos en el laboratorio siguiendo los métodos oficiales de análisis de suelos, propuestos por MAPA (1986), mediante el desplazamiento del volumen conocido de fluidos y determinación por pesada de la masa del suelo y los residuos (método usando un picnómetro). Esta densidad nos da información solamente sobre las partículas sólidas del suelo, sin considerar su porosidad.
- Porosidad: Una vez obtenidos los valores de densidad aparente y real de los suelos y los residuos orgánicos, podemos con la ecuación $(1 - \frac{da}{dr}) \times 100$ que

relaciona las dos propiedades físicas obtener la porosidad (Nimmo, 2004; Porta, *et al.*, 1994).

3.6. Caracterización de residuos.

Para preparar las muestras de los residuos, se procedió con el volcado en bandejas de los residuos ya preparados para el ensayo, sin los fragmentos inservibles de la palmera y la paja partida, y dejarlos en condiciones de analizarlos. Siguiendo la metodología de las normas UNE-EN se han determinado los siguientes parámetros:

- Densidad aparente (d_a). Calculadas según las directrices de la norma UNE-EN 13040, mediante compresión de una masa conocida de la muestra en un cilindro de volumen conocido.
- Densidad real (d_r): la densidad real de los residuos la calculamos en el laboratorio siguiendo los métodos oficiales de análisis de suelos, propuestos por MAPA (1986), mediante el desplazamiento del volumen conocido de fluidos y determinación por pesada de la masa del suelo y los residuos (método usando un picnómetro).

Tabla 3: Densidad aparente y real de los residuos utilizados (paja y hoja de palmera).

	RESIDUO PALMERA	RESIDUO PAJA
Densidad real (kg/m^3)	870	405
Densidad aparente (kg/m^3)	84	29
Porosidad (%)	90,2	92,9

3.7. Tratamientos establecidos.

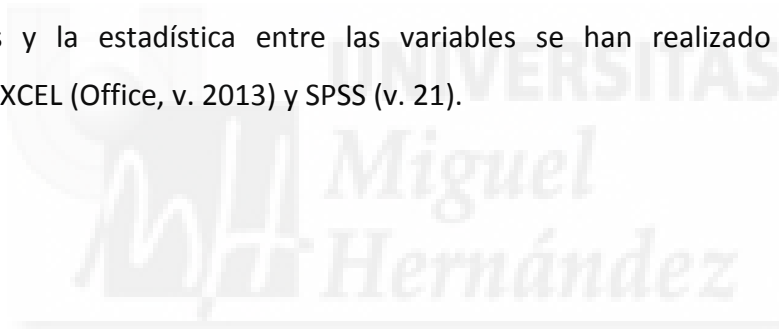
Una vez analizados los suelos y los residuos, se prepararon las distintas mezclas con suelo (suelos 1 y 2) y de los dos residuos, paja de heno y hoja de palmera (mezclas en porcentaje en función del peso: 0; 1,5; 3; 4,5 y 6,0) que combinadas dieron lugar a los dieciocho tratamientos (el tratamiento de suelo 1 y 2 en blanco, sin adición de residuo

es el mismo), con seis repeticiones para cada uno. Las mezclas realizadas para el ensayo se han realizado considerando las relaciones establecidas en porcentajes peso/peso.

3.8. Tratamiento estadístico.

Se ha determinado la media y la desviación estándar (estadística descriptiva) para los resultados obtenidos, mostrándose este último parámetro en las tablas de resultados correspondientes a los parámetros densidad aparente y densidad real. Además, para poder determinar si existen diferencias significativas, debido a los tratamientos aplicados (tipo y dosis de residuo), sobre los resultados de la porosidad y conductividad hidráulica de los suelos, se ha procedido a realizar el análisis de varianza (ANOVA) de un factor y se ha aplicado el test de Turkey de comparaciones múltiples entre poblaciones.

Los cálculos y la estadística entre las variables se han realizado mediante los programas EXCEL (Office, v. 2013) y SPSS (v. 21).



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La perturbación del espacio poroso, provocada por una carga que supera la resistencia del suelo y produce el colapso de los poros, conduce a procesos de degradación edáfica, declinación productiva de los ecosistemas e impactos hidrológicos importantes (Li *et al.*, 2009; Muhammad y Rattan, 2009); además, en los procesos de recuperación de suelos salinos y sódicos, entre otros, se necesita que el movimiento de agua vertical en los suelos sea eficaz. Por estas razones, entendemos es relevante prestar atención a propiedades como la densidad aparente, la densidad real, porosidad y conductividad hidráulica, contribuyendo al conocimiento en cuanto a su cuantificación y evolución, bajo diferentes situaciones.

4.1. Densidad real.

En este apartado, se presentan los datos relativos a la densidad real, parámetro necesario a la hora de determinar la porosidad. Las tablas 4 y 5 muestran los resultados para las mezclas con paja de heno y con triturado de hoja de palmera, respectivamente, indicándose los valores medios procedentes de las réplicas y la desviación estándar (σ). Esta densidad real es la densidad del volumen de sólidos de cada una de las mezclas realizadas (0, 1,5, 3,0, 4,5 y 6,0 % de residuo orgánico añadido en proporción p/p).

Tabla 4. Densidad real (kg/m^3) de las mezclas suelo-paja.

Paja (%)	Suelo 1		Suelo 2	
	dr	σ	dr	σ
0	2125	38	2210	60
1.5	2098	35	2181	52
3.0	2070	42	2153	56
4.5	2043	35	2124	45
6.0	2015	30	2095	43

Se puede apreciar, como era esperable, que la densidad real disminuya conforme aumenta el volumen de residuo añadido. Por otro lado, la disminución de la densidad real es menor en las mezclas donde se ha añadido residuo de palmera puesto que este material, inicialmente, tiene una densidad real mayor que la paja de heno, como se indicaba anteriormente en la tabla 3.

Tabla 5. Densidad real (kg/m³) de las mezclas suelo-palmera.

Palmera (%)	Suelo 1		Suelo 2	
	dr	σ	dr	σ
0	2125	38	2210	60
1,5	2101	42	2184	59
3,0	2076	40	2159	46
4,5	2052	33	2133	42
6,0	2028	33	2108	37

4.2. Densidad aparente.

La densidad aparente de los distintos tratamientos se calcula a partir de las mezclas preparadas de cada suelo con los dos residuos orgánicos empleados, cuando son introducidas en los cilindros para determinar la conductividad hidráulica y previamente a la determinación de esta, conociendo, en cada caso, el peso suelo + residuo y el volumen que ocupa.

Para cada uno de los tratamientos se preparan 6 cilindros o réplicas, colocando en ellos las mezclas sin compresión. Los resultados se muestran en las tablas 6 y 7.

Tabla 6. Densidad aparente (kg/m³) de las mezclas suelo-paja.

Paja (%)	Suelo 1		Suelo 2	
	da	σ	da	σ
0	1433 a	25	1580 a	29
1.5	1218 b	22	1285 b	27
3,0	990 c	74	1000 c	69
4,5	740 d	23	813 d	49
6,0	647 e	27	677 d	26
F	406 ***		422 ***	

Valores de F seguidos de *, ** y *** indican diferencias significativas a $p=0,05$, $0,01$ y $0,001$, respectivamente. Por columnas, valores medios con letras en común son estadísticamente iguales a $p=0,05$.

Para los dos suelos utilizados en este experimento, la densidad aparente evoluciona de manera muy similar a la densidad real. Las adiciones de residuos orgánicos disminuyen la densidad de los suelos, más cuanto mayor es el volumen de residuo utilizado en las mezclas. Además de este efecto, se nota la influencia de la mayor densidad de la hoja de palmera, ya que la densidad aparente en los tratamientos donde se ha utilizado, es mayor que en aquellos donde ha sido la paja el residuo orgánico empleado.

Tabla 7. Densidad aparente (kg/m³) de las mezclas suelo-palmera.

Palmera (%)	Suelo 1		Suelo 2	
	da	σ	da	σ
0	1433 a	25	1580 a	29
1,5	1337 b	28	1452 b	22
3,0	1220 c	20	1390 c	22
4,5	1138 d	13	1217 d	47
6,0	1017 e	37	972 e	82
F	237 ***		155 ***	

Valores de F seguidos de *, ** y *** indican diferencias significativas a $p=0,05$, $0,01$ y $0,001$, respectivamente. Por columnas, valores medios con letras en común son estadísticamente iguales a $p=0,05$.

4.3. Porosidad.

Una vez conocidos los valores de la densidad real y la densidad aparente, se puede obtener, mediante su relación, la porosidad del suelo. Es indudable que este parámetro edáfico, que engloba la macroporosidad y la microporosidad, se ve alterado por el tipo de residuo incorporado y la dosis añadida.

Si nos centramos en el concepto de porosidad textural como equivalente a la porosidad total, esta puede estar en buena medida asociada a la densidad aparente inicial de los suelos. Apreciamos inicialmente en la tabla 6, que el suelo 2, el menos arenoso, tiene una mayor densidad aparente y densidad real que el suelo 1, franco-arcillo-arenoso.

Los resultados de la porosidad expresada en porcentaje, junto al análisis de varianza de una vía y el test de comparaciones múltiples, para ver la significancia del tipo de residuo y dosis aplicada, se muestra en las tablas 8 y 9, respectivamente.

Podemos apreciar que, en ambos suelos, la aplicación de proporciones crecientes de los dos residuos, producen incrementos altamente significativos en los valores de porosidad, aunque no sea una variación proporcionalmente lineal a la cantidad de residuo adicionado. Se observa que la adición de paja de heno incrementa en mayor medida la porosidad de los suelos que la hoja de palmera, en todos los tratamientos, alcanzándose, con la adición del 6% de paja, valores de porosidad prácticamente iguales en los dos suelos, a pesar de que el valor de este parámetro es inicialmente diferente en los dos suelos.

Tabla 8. Valores de Porosidad (%) en el Suelo 1. Efecto del tipo y dosis de residuos aplicados.

Tipo de Residuo	% Residuo					F
	0	1,5	3,0	4,5	6,0	
Palmera	32,7 a	36,4 b	41,2 c	44,5 d	49,9 e	173 ***
Paja	32,7 a	41,9 b	52,2 c	63,7 d	67,9 e	124 ***
F	0 ns	65,5 ***	50,9 ***	1332***	377 ***	

Valores de F seguidos de *, ** y *** indican diferencias significativas a $p= 0,05$, $0,01$ y $0,001$, respectivamente. Por filas, valores medios con letras en común son estadísticamente iguales a $p=0,05$.

Tabla 9. Valores de Porosidad (%) en el Suelo 2. Efecto del tipo y dosis de residuos aplicados.

Tipo de Residuo	% Residuo					F
	0	1,5	3,0	4,5	6,0	
Palmera	28,5 a	33,5 b	35,6 b	42,9 c	53,9 d	124 ***
Paja	28,5 a	41,1 b	53,5 c	61,7 d	67,8 e	367 ***
F	0 ns	138 ***	167 ***	207 ***	69,3 ***	

Valores de F seguidos de *, ** y *** indican diferencias significativas a $p= 0,05$, $0,01$ y $0,001$, respectivamente. Por filas, valores medios con letras en común son estadísticamente iguales a $p=0,05$.

4.4. Conductividad hidráulica saturada.

En las tablas 10 y 11 se muestran los resultados de los valores de la conductividad hidráulica saturada (K_{hs}), para cada uno de los suelos, en función de las diferentes dosis aplicadas de las dos enmiendas utilizadas, paja de heno y hoja de palmera triturada.

Se aprecia la gran diferencia entre los valores de la conductividad hidráulica inicial de los dos suelos, muy inferior en el suelo 2, como consecuencia de su diferente textura. Estos datos de K_{hs} son bastante coincidentes con los citados por Gabriels *et al.* (2006) para suelos franco-arenosos ($12,5 \text{ cm h}^{-1}$), franco-arcillo-arenosos ($2,3 \text{ cm h}^{-1}$) y franco-arcillosos ($0,9 \text{ cm h}^{-1}$), determinados para suelos naturales; en nuestro experimento, al

realizarse con muestras de suelo alterado, existen ciertas diferencias con el dato de K_{hs} referenciado para suelos franco-arcillo-arenosos.

Tabla 10. Valores de K_{hs} (cm h^{-1}) en el Suelo 1. Efecto del tipo y dosis de residuos aplicados.

Tipo de Residuo	% Residuo					F
	0	1,5	3,0	4,5	6,0	
Palmera	10,9 a	17,2 b	22,5 c	28,8 d	41,1 e	132 ***
Paja	10,9 a	23,8 ab	43,8 bc	63,1 c	139,6 d	75,3 ***
F	0 ns	22,3 ***	94,1 ***	136 ***	61,2 ***	

Valores de F seguidos de *, ** y *** indican diferencias significativas a $p=0,05$, $0,01$ y $0,001$, respectivamente. Por filas, valores medios con letras en común son estadísticamente iguales a $p=0,05$.

Los resultados experimentales ponen de manifiesto el significativo efecto que tiene la incorporación de las enmiendas sobre la conductividad hidráulica de los dos suelos utilizados. Resaltar que, por sus características, la paja de heno produce un mayor incremento de la K_{hs} que el residuo de palmera, en todas las dosis ensayadas.

Tabla 11. Valores de K_{hs} (cm h^{-1}) en el Suelo 2. Efecto del tipo y dosis de residuos aplicados.

Tipo de Residuo	% Residuo					F
	0	1,5	3,0	0	1,5	
Palmera	1,19 a	1,82 b	2,65 c	3,83 d	5,60 e	225 ***
Paja	1,19 a	4,09 a	12,7 b	27,4 c	46,5 d	175 ***
F	0 ns	406 ***	163 ***	194 ***	255 ***	

Valores de F seguidos de *, ** y *** indican diferencias significativas a $p=0,05$, $0,01$ y $0,001$, respectivamente. Por filas, valores medios con letras en común son estadísticamente iguales a $p=0,05$.

Es igualmente claro, el efecto del incremento de los porcentajes de las enmiendas orgánicas, sobre el aumento de la conductividad hidráulica de los suelos, produciéndose, en todos los casos, diferencias estadísticamente significativas entre

tratamientos, considerando tanto el factor diferencial residuo como la dosis aplicada de estos.



5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas en este trabajo, derivadas de los objetivos planteados en el mismo indican que:

- El uso de los residuos orgánicos de hoja de palmera y paja de heno, disminuyen la densidad aparente de los suelos cuando son aplicados, siguiendo básicamente una misma tendencia en ambos casos.
- La porosidad de las mezclas suelo y residuo, se ve influenciada por la adición de ambos residuos, desde el primer tratamiento (1,5%), aumentando con la dosis de aplicación.
- La incorporación de dosis crecientes de los residuos considerados en este trabajo, favorecen el incremento de la conductividad hidráulica saturada en los suelos enmendados.
- La paja de heno, a igual porcentaje en peso de incorporación a los suelos, produce mayores variaciones de densidad aparente, porosidad y K_{hs} , que la hoja de palmera triturada.
- Ambos residuos han resultado eficaces para modificar las propiedades físicas de los suelos, cuantificadas en el presente trabajo, siendo, por tanto, susceptibles de aplicarse en técnicas de agricultura sostenible, para mejorar propiedades físicas de los suelos, como las aquí estudiadas.

6. BIBLIOGRAFÍA

- AENOR. UNE 103-302:1994 “Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo”.
- AENOR. UNE 77308:2001. Calidad del suelo. Determinación de la conductividad eléctrica específica.
- AENOR. UNE 77315:2001. Calidad del suelo. Extracción de oligoelementos con una disolución tampón de ADTP.
- AENOR. UNE 77317:2001. Calidad del suelo. Determinación del contenido en carbonato. Método volumétrico.
- AENOR. UNE-EN 13038:2001. Mejoradores del suelo y sustratos de cultivo. Determinación de la conductividad eléctrica.
- AENOR. UNE-EN 13039:2001. Mejoradores del suelo y sustratos de cultivo. Determinación del contenido en materia orgánica y de las cenizas.
- AENOR. UNE-EN 13040:2008. Mejoradores del suelo y sustratos de cultivo. Preparación de las muestras para ensayos físicos y químicos. Determinación del contenido de materia seca, del contenido en humedad y de la densidad aparente compactada en el laboratorio.
- Allison, F.E., 1973. Soil Organic Matter and its Role in Crop Production. Ed. Elsevier .
- Annabi, M., Le Bissonais, Y., Le Villio-Poitrenaud, M., Houot, S., 2011. Improvement of soil aggregate stability by repeated applications of organic amendments to a cultivated silty loam soil. *Agric. Ecosyst. Environ.* 144, 382–389.
- Arshad, M.A., Lowery, B., Grossman, B., 1996. Physical tests for monitoring soil quality. In: Doran, J.W., Jones, A.J. (eds.), *Methods for Assessing Soil Quality*. Publ. 49, pp. 123–142. Ed. Soil Science Society of America.
- Batey, T., 2009. Soil compaction and soil management — a review. *Soil Use and Management* 25 (4), 335–345.
- Blake, G.R., Hartge, K.H., 1986. Bulk density. *Methods of soil analysis, part 1*. pp. 363–376 (Madison, WI, USA). Ed. Soil Science Society of America.
- Blevins, R.L., Frye, W.W., 1993. Conservation tillage: an ecological approach to soil management. *Adv. Agron.* 51, 33–78.

- Chan, K.Y., Heenan, D.P., So, H.B., 2003. Sequestration of carbon and changes in soil quality under conservation tillage on light textured soils in Australia: a review. *Aust. J. Exp. Agric.* 43, 325–334.
- Diacono, M., Montemurro, F., 2010. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30, 401–422.
- Díez, J. A. 1982. Consideraciones sobre la utilización de la técnica extractiva para la evaluación de fósforo asimilable en suelos. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 41, 1345-1353.
- Drew, L.A., 1973. Bulk Density Estimation Based on Organic Matter Content of Some Minnesota Soils. *Minnesota Forestry Research Notes*.
- Gabriels, D., Lobo L., D. y Pulido M., M. 2006. Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos. *Venezuelos* 14, 7-22.
- Grosbellet, C., Vidal-Beaudet, L., Caubel, V., Charpentier, S., 2011. Improvement of Hansen, B., Schjøning, P., Sibbesen, E., 1999. Roughness indices for estimation of depression storage capacity of tilled soil surfaces. *Soil Till. Res.* 52, 103–111.
- Hartmann, R. 2000. *Soil Physics. Lecture notes*, Dept of Soil Management and Soil Care, Ghent University, Belgium.
- Hu, W., Shao, M.A., Si, B.C., 2012. Seasonal changes in surface bulk density and saturated hydraulic conductivity of natural landscapes. *Eur. J. Soil Sci.* 63, 820–830.
- Kay, B.D., 1998. Soil structure and organic carbon: a review. In: Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F., Stewart, B.A. (eds.), *Soil Processes and the Carbon Cycle*. pp. 169-197. Ed. CRC Press.
- Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304, 1623–1627.
- Low, A.J., 1973. Soil structure and crop yield. *J. Soil Sci.* 24, 249-259.
- MAPA, 1986. *Métodos oficiales de análisis*. Tomo III. Ed. MAPA.
- Marmo, L., 2008. EU strategies and policies on soil and waste management to offset greenhouse gas emissions. *Waste Manag.* 28, 685–689.

- Martin, M.P., Seen I, D., Boulonne, L., Jolivet, C., Nair, K.M., Bourgeon, G., Arrouays, D., 2009. Optimizing pedotransfer functions for estimating soil bulk density using boosted regression trees. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73, 485–493.
- Mwendera, E.J., Feyen, J., 1993. Predicting tillage effects on infiltration. *Soil Sci.* 155, 229–235.
- Nimmo, J.R., 2004, Porosity and Pore Size Distribution. En Hillel, D., (ed.), *Encyclopedia of Soils in the Environment*, v. 3, p. 295-303. Ed. Elsevier
- Porta, J; López-Acevedo; Roquero, C.1999. *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. Ed. Mundi-Prensa.
- Rico Hernández, J.; Navarro-Pedreño, J.; Gómez, I. (2016). Evaluation of plant waste used as mulch on soil moisture retention. *Spanish J. Soil Sci.* 6(2), 133-144.
- Schjønning, P., Thomsen, I.K., 2013. Shallow tillage effects on soil properties for temperate-region hard-setting soils. *Soil Till. Res.* 132, 12–20.
- Smika, D.E., Unger, P.W., 1986. Effect of surface residues on soil water storage. *Adv. Soil Sci.* 5, 111–138.
- soil structure formation by degradation of coarse organic matter. *Geoderma* 162, 27–38.
- Watts, C.W., Clark, L.J., Poulton, P.R., Powlson, D.S., Whitmore, A.P., 2006. The role of clay, organic carbon and long-term management on mouldboard plough draught measured on the Broadbalk wheat experiment at Rothamsted. *Soil Use Manag.* 22, 334–341.

6.1. Consultas en internet.

European Commission, 2010. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament on future steps in bio-waste management in the European Union.

http://ec.europa.eu/environment/waste/compost/pdf/com_biowaste.pdf.

Khokhar, T., Kashiwase, H., 2017. La población mundial en el future en cuatro gráficos. Ed. Banco Mundial. <http://blogs.worldbank.org/opendata/es/la-poblacion-mundial-en-el-futuro-en-cuatro-graficos>

Schils, R., Kuikman, P., Liski, J., Oijen, M.V., Smith, P., Webb, J., Alm, J., Somogyi, Z., Akker, J.V.D., Billett, M., Emmett, B., Evans, C., Lindner, M., Palosuo, T., Bellamy, P., Alm, J., Jandl, R., Hiederer, R., 2008. Review of Existing Information on the Interrelations Between Soil and Climate Change. Wageningen UR, Wageningen Netherlands. <http://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/>.

Topics of the European Union. http://europa.eu/pol/pdf/flipbook/es/agriculture_es.pdf



7. ANEXOS

7.1. Figuras

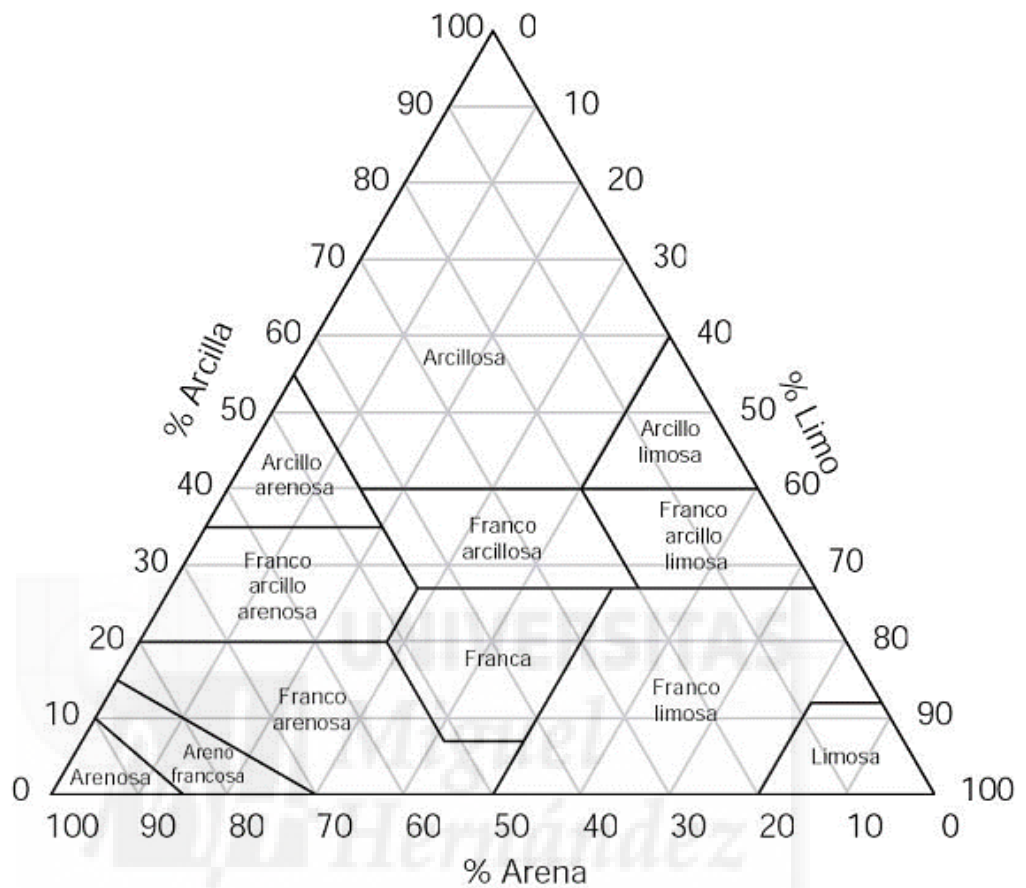


Figura 2: Triángulo textural según clasificación USDA.