

# Valoración de mezclas de paja de cereal y compost de EDAR como componentes de tecnosuelos.

## Análisis de propiedades físicas y físico-químicas

Grado en Ciencias Ambientales

Trabajo de Fin de Grado

Curso 2020/2021

Autor: Pablo Hernández Maciá

Tutores: Ignacio Gómez Lucas y María Teresa Rodríguez Espinosa

Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente



FACULTAD DE CIENCIAS  
EXPERIMENTALES

**UNIVERSITAS**  
*Miguel Hernández*

## Resumen

Este trabajo tiene como objetivo estudiar las características de distintos residuos orgánicos y evaluar el uso de mezclas de paja de cereal y compost de EDAR, en distintas proporciones como enmienda orgánica susceptible de ser un componente de tecnosuelos. Se ha analizado diversas propiedades físicas y físico-químicas de los materiales y de mezclas binarias paja cereal-compost biosólido. Los resultados sugieren que las mezclas de paja de cereal y compost de EDAR podrían sustituir el uso de compost comerciales y ser un material aceptable para generar tecnosuelos.

### Palabras clave:

Tecnosuelo, mejorador del suelo, fertilizante orgánico, residuo orgánico, paja de cereal, compost de EDAR.

## Abstract



The objective of this work is to study the characteristics of different organic waste and to evaluate the use of mixtures of cereal straw and WWTP compost, in different proportions as organic amendment capable of being a component of technosoils. Various physical and physicochemical properties of the materials and binary mixtures of cereal straw-biosolid compost have been analyzed. The results suggest that mixtures of cereal straw and WWTP compost could replace the use of commercial compost and be an acceptable material to generate technosoils.

### Keywords:

Technosoil, soil improver, organic fertilizer, organic residue, cereal straw, WWTP compost.

# Índice

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	3
1.1. El suelo .....	3
1.1.1. Importancia y funciones del suelo .....	3
1.1.2. Propiedades del suelo .....	5
1.2. Residuos .....	8
1.2.1. Concepto de residuo .....	8
1.2.2. Residuos como enmiendas de suelo .....	9
1.3. Tecnosuelos.....	11
<b>2. Objetivos</b> .....	12
<b>3. Materiales y Métodos</b> .....	13
3.1. Caracterización de los materiales .....	13
3.2. Materiales escogidos para las mezclas .....	20
3.3. Preparación y tratamiento de las mezclas .....	21
3.3.1. Caracterización de las mezclas .....	22
3.4. Métodos analíticos .....	23
<b>4. Resultados y discusión</b> .....	24
4.1. Densidad real.....	24
4.2. Densidad aparente .....	25
4.3. Porosidad.....	26
4.4. Conductividad hidráulica.....	27
4.5. Retención hídrica .....	28
4.6. Conductividad eléctrica.....	29
4.7. pH .....	30
4.8. Materia orgánica y humedad .....	31
4.9. Mezclas vs compost comercial.....	32
<b>5. Conclusiones</b> .....	33
<b>6. Bibliografía</b> .....	34

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. El suelo

El suelo, según la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), es un componente esencial de la "Tierra" y "Ecosistemas". Ambos son conceptos más amplios que abarcan la vegetación, el agua y el clima en el caso de la tierra, y además incluye también las consideraciones sociales y económicas en el caso de los ecosistemas.

Por otro lado, según la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo la definición de suelo es: "Sistema natural vivo, dinámico, organizado y complejo, que es el resultado de:

- Procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar tras instalarse microorganismos y plantas en un en un material originario natural más o menos meteorizado o de origen antrópico.
- Intercambios de masa y de energía con su entorno.
- Una organización de los materiales que conduce a la diferenciación de distintas capas u horizontes, los cuales están relacionados genéticamente entre ellos debido a procesos de adición, pérdida, transferencia y/o transformación, que han actuado bajo el control de un conjunto de factores de formación (roca madre, clima, topografía, organismos vivos y tiempo)."

### 1.1.1. Importancia y funciones del suelo

El suelo es un recurso natural finito o no renovable a escala humana de tiempo, ya que, la formación de un solo centímetro de suelo puede tardar aproximadamente unos 1000 años (FAO, 2015). Debido a esto y a los servicios ecosistémicos que realiza, proteger el suelo tiene una gran importancia.

Los suelos, como parte de los ecosistemas y de los agroecosistemas, prestan importantes funciones o servicios que mantienen a estos y que apoyan las actividades sociales y económicas de las personas (Burbano-Orjuela, 2016).

Estas funciones o servicios ecosistémicos, según la FAO, son:

- Retención de carbono.
- Purificación del agua y reducción de contaminantes del suelo.
- Regulación del clima.
- Ciclo de nutrientes.
- Hábitat para organismos.
- Regulación de inundaciones.
- Fuente de productos farmacéuticos y recursos genéticos.
- Base para las infraestructuras humanas
- Suministro de materiales de construcción.
- Herencia cultural.
- Suministro de alimentos, fibras y combustibles.

La enumeración y descripción de las funciones que cumple, pone de manifiesto que el suelo no solo permite que las personas dispongan de alimento sino que por el espectro de servicios ambientales que presta y promueve para beneficio de las personas, este recurso adquiere la categoría de “bien social” que por lo mismo amerita su conocimiento por parte de la sociedad mundial para que lo valore, lo proteja y lo conserve, como una obligación resulta ser en los actuales momentos un imperativo ético. Entonces, se debe conocer y respetar el suelo para hacer el mejor uso posible de este recurso, sin olvidar que existe una relación inexorable entre el sistema natural y el sistema sociocultural. (Burbano-Orjuela, 2016).

## 1.1.2. Propiedades del suelo

### 1.1.2.1. *Propiedades físicas*

Las características físicas son en gran parte responsables del buen desarrollo de las plantas pero muy pocas veces se les tiene en cuenta, pues generalmente sólo se consideran las características químicas. En realidad para que exista un medio óptimo para el crecimiento de las plantas debe darse una interacción dinámica entre las características físicas, químicas y biológicas del suelo.

El comportamiento mecánico de la fase sólida determina a su vez las propiedades físicas del suelo, las cuales en asociación con las características químicas generan el sustrato adecuado para producir cosechas (Montenegro y Malagón, 1990). La atención prestada a las propiedades físicas del suelo ha sido en general, menor que las dadas a las propiedades químicas y a la importancia que se le da en la actualidad a las biológicas. Conviene indicar que el estudio de estas propiedades físicas requiere en ocasiones, la utilización de métodos más específicos o aparentemente de mayor complejidad estructural. La estandarización de esta metodología para determinar propiedades físicas de los suelos y su aceptación universal no siempre es sencilla, aunque la implantación de normativas internacionales como las normas ISO, entre otras, está impulsando este tema. No debemos de olvidar que las propiedades físicas son de igual o incluso de mayor importancia que las químicas y biológicas para la funcionalidad y la calidad de los suelos (Dexter, 2004).

Las propiedades que más nos interesan para este estudio son:

- Conductividad hidráulica saturada (Kh): es un parámetro que indica la facilidad con la que los poros del suelo permiten el movimiento del agua y es dependiente de la porosidad, permeabilidad y grado de saturación presente (Barbecho y Calle, 2012).
- Capacidad de retención hídrica (CRH): Agua contenida en el suelo disponible para las plantas. Normalmente se considera que es el agua contenida en el

suelo, comprendida entre el índice de marchitez y la capacidad de campo. En este contexto, la capacidad de retención de agua de un terreno se identifica con el agua disponible (UNESCO/WMO Glosario Internacional de Hidrología).

- Densidad real ( $D_r$ ): La densidad real, también conocida como densidad de sólidos o densidad de las partículas, se define como la relación existente entre el peso de los sólidos del suelo y el volumen ocupado por los mismos. Para determinar la densidad real se utiliza el picnómetro y líquidos no polares, como por ejemplo el tolueno, o polares, como el agua. (Ingaramo, 2007).
- Densidad aparente ( $D_a$ ): que es la relación entre el volumen total de sólidos del suelo y su masa, utilizada como indicador de calidad del suelo, con la que se puede determinar alteraciones producidas por las actividades antrópicas como uso de arado, maquinaria pesada, cultivos, pudiendo indicar el grado de compactación del suelo y las limitaciones para el crecimiento de las raíces (Miralles, 2006).
- Porosidad ( $P_t$ ): representa el porcentaje del volumen de suelo que no se encuentra ocupado por sólidos y está constituido aproximadamente del 50% por materiales sólidos y el otro 50% por espacio poroso, donde nutrientes, aire, gases y agua pueden circular (FAO, 2016).

La porosidad de aireación es la que no retiene agua y sirve para el intercambio gaseoso, por tanto, genera una idea de la proporción de poros de mayor tamaño (FAO, 2016).

### 1.1.2.2. *Propiedades físico-químicas*

La meteorización del material de partida por el agua determina, en gran medida, la composición química del suelo que por último se ha producido. Algunas sustancias químicas se lixivian en las capas inferiores del suelo donde se acumulan, mientras que otras sustancias químicas, que son menos solubles, quedan en las capas superiores del suelo. Las sustancias químicas que se eliminan con más rapidez son los cloruros y los sulfatos, a los que siguen el calcio, el sodio, el magnesio y el potasio.

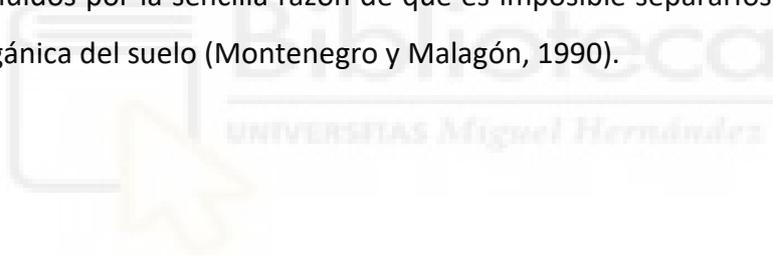
Desde el punto de vista general, la composición elemental de los suelos varía de acuerdo a la naturaleza de la roca madre y los cambios producidos durante la meteorización, acumulación de materia orgánica y prácticas de manejo. Un factor importante es la movilidad relativa de los distintos elementos, que determina pérdidas diferenciales durante los procesos de meteorización y formación del suelo. (Rucks *et al.*, 2004).

Los silicatos y los óxidos del hierro y el aluminio se descomponen con mucha lentitud y apenas se lixivian. Cuando algunos de estos productos se ponen en contacto con el aire del suelo, tienen lugar reacciones químicas como, en particular la oxidación, que provoca la formación de sustancias químicas más solubles o más frágiles que las originales. En consecuencia, se aceleran los procesos de meteorización, aumenta la lixiviación de las sustancias químicas y se producen otros cambios en la composición química del suelo.

- pH: Valor absoluto del logaritmo decimal de la concentración de hidrogeniones en un medio, que se utiliza como indicador de acidez ( $\text{pH} < 7$ ) o de alcalinidad ( $\text{pH} > 7$ ). (UNESCO/WMO Glosario Internacional de Hidrología).
- Conductividad eléctrica (CE): La CE mide la capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica al aprovechar la propiedad de las sales en la conducción de esta; por lo tanto, la CE mide la concentración de sales solubles presentes en la solución del suelo. Su valor es más alto cuanto más fácil se mueva dicha corriente a través del mismo suelo por una concentración más elevada de

sales. Estas sales reducen el potencial osmótico de la solución del suelo, reduciendo al mismo tiempo la disponibilidad de agua para las plantas, a pesar de que el suelo muestre niveles razonables de humedad. (Intagri, 2017).

- Materia orgánica (MO): La materia orgánica (MO) constituye una parte integral de cada suelo, la cual afecta sus condiciones físicas, químicas, y biológicas en un mayor grado que lo podría indicar su proporción en el suelo. Todas las sustancias orgánicas en el suelo vivas o muertas, frescas o descompuestas, son parte de la materia orgánica del suelo. Esta incluye las raíces, residuos de plantas y animales en todos los estados de descomposición, humus, microorganismos y cualquier compuesto orgánico. Por otro lado las bacterias, hongos y otros microorganismos vivos son incluidos por la sencilla razón de que es imposible separarlos de la materia orgánica del suelo (Montenegro y Malagón, 1990).



## 1.2. Residuos

### 1.2.1. Concepto de residuo

La RAE define residuo como: “material que queda como inservible después de haber realizado un trabajo u operación”, “aquellas materias derivadas de actividades de producción y consumo que no han alcanzado ningún valor económico” según la ley 42/75 de la legislación española o “cualquier sustancia u objeto del cual se desprende su poseedor o tiene obligación de desprenderse” según la directiva europea CEE 75/ 442.

El desaprovechamiento de los residuos y la no gestión de estos pueden acarrear problemas importantes, sobre todo para el medio ambiente. A esta situación debemos unir el agotamiento de los recursos naturales no renovables, que puede conducir a una escasez de muchos de ellos a medio o corto plazo. Por tanto, deben ser estudiados, analizados y transformados, en la medida que sea posible, los residuos originados por nuestro modo de vida, lo que permitiría una disminución de los daños sobre el medio ambiente y su consideración como recursos. Navarro-Pedreño *et al.*, 1995).

### 1.2.2. Residuos como enmiendas de suelo

Hasta hace pocos años, el empleo de turbas y estiércoles eran las fuentes naturales para introducir materia orgánica en el suelo (enmiendas orgánicas), y mantener con ello un adecuado equilibrio que permitiese conservar así mismo su fertilidad. Sin embargo, debido a la mecanización de las tareas agrícolas, de una parte, y a la escasez de turbas por otra, ya no es factible en amplias zonas como el sudeste español recurrir a las fuentes de materia orgánica tradicionales. (García, C., 2008).

Teniendo en cuenta lo anterior, y con ánimo de buscar una alternativa eficaz a nuevas fuentes de materia orgánica para ser adicionadas a los suelos, se puede hoy en día proponer diversos residuos orgánicos entre los que podemos citar a algunos de origen animal como los estiércoles, así como de origen urbano y entre ellos los lodos EDAR (lodos generados en el tratamiento de aguas residuales urbanas) o incluso la fracción orgánica de residuos domésticos, que junto a otros residuos orgánicos procedentes de la agricultura o de la industria agroalimentaria, pueden constituir una adecuada fuente de materia orgánica para suelos. (Banegas *et al.*, 2007).

La materia orgánica actúa como un depósito de elementos nutritivos que son esenciales para el desarrollo de las plantas. La mayor parte del nitrógeno del suelo se presenta en combinaciones orgánicas. También una cantidad considerable del fósforo y el azufre existe en formas orgánicas. Cuando la materia orgánica se descompone, es decir, se

mineraliza, proporciona a las plantas los nutrientes necesarios para su desarrollo (Burbano, 1989).

La materia orgánica del suelo, entonces, juega un importante papel, ya que regula los procesos químicos que allí suceden e influye sobre las propiedades físicas y, además configura el núcleo de casi todas las actividades biológicas que se desarrollan en el suelo, por parte de la microflora, la fauna y también el sistema de raíces de las plantas superiores (Burbano, 1989).

Por ello, la pérdida de la materia orgánica es una de las grandes amenazas para el suelo, porque con ella no solo se ponen en riesgo sus funciones y su fertilidad, sino que también lo hacen propenso a la erosión (García, 2010).

Las enmiendas de suelo con paja de arroz aumenta el contenido de NPK del suelo en un 20% en comparación con fertilizantes inorgánicos. La utilización eficaz de estos recursos para enriquecer el suelo reducirá el uso de fertilizantes inorgánicos, mejorará la estructura y la productividad del suelo. El uso de paja procedente de diversos cultivos, ya sea directa o indirectamente, como una opción de manejo del suelo es una alternativa barata con una tasa de aplicación fácil, que es, a su vez, respetuosa con el medio ambiente y sin peligro para la salud humana (Wang, Y. et al, 2019).

Nigussie et al. (2015) aludieron a la combinación de fertilizantes orgánicos hechos de paja de cultivo y fertilizantes inorgánicos como la mejor alternativa para mejorar el contenido de nutrientes del suelo, estos resaltaron que la integración de fertilizantes minerales y enmiendas orgánicas como paja de cultivo es la opción más sostenible para incrementar la producción agrícola y la materia orgánica del suelo.

### 1.3. Tecnosuelos

Los suelos, además de ser un componente esencial de los ecosistemas naturales son un componente fundamental de las infraestructuras verdes (Deeb et al., 2018), y una solución no común para las necesidades urbanas de EGD (Deeb et al., 2020), y se podrían utilizar subproductos de diferente naturaleza y propiedades para elaborar nuevos suelos urbanos (Li et al., 2018), como tecnosuelos. De hecho, los suelos urbanos pueden estar hechos de materiales exógenos que, debido a perturbaciones de las actividades humanas, han perdido sus funciones naturales, convirtiéndose en tecnosuelos (IUSS 2015).

Los tecnosuelos han sido creados involuntariamente (Santos et al., 2016) por el hombre, asociados con la manipulación de los suelos donde tienen lugar las actividades humanas.

Los tecnosuelos son suelos diseñados con la intención de proporcionar servicios ecosistémicos similares a los que ofrecen los suelos naturales, o mejorar estos servicios; por tanto, superaría los suelos naturales, asegurando la salud humana y ambiental (Rodríguez-Espinosa et al., 2021).

Basándose en la economía circular, Rodríguez-Espinosa et al. (2021), proponen el uso de residuos procedentes de la actividad humana para generar tecnosuelos y así se evita la extracción de recursos naturales. Por ello es necesario averiguar si los tecnosuelos pueden ser funcionales, comprobar sus propiedades físico-químicas y probar la capacidad de crecimiento vegetal.

Los tecnosuelos son una solución óptima que no compromete el medio ambiente ni la salud humana. (Baragaño et al., 2020; Herrán Fernández et al., 2016).

## 2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es analizar determinadas propiedades físicas (densidad aparente y real, porosidad, capacidad de retención hídrica y la conductividad hidráulica saturada) y físico-químicas (pH, conductividad eléctrica, porcentaje en materia orgánica total) en distintas mezclas binarias generadas con diferentes proporciones de dos residuos orgánicos, paja de cereal y compost de lodo de EDAR, para valorar su posterior uso como tecnosuelos o enmiendas mejoradoras del suelo. Con este estudio se pretende contribuir a la gestión sostenible del suelo y de los residuos, dentro de un contexto de economía circular.

- Estudiar las propiedades físico-químicas de los diferentes residuos y de un compost comercial, usado como material de referencia.
- Preparación de las mezclas binarias con los dos residuos orgánicos en distintas proporciones.
- Determinar las propiedades físicas y fisicoquímicas indicadas en las mezclas binarias y comprobar si existen variaciones significativas en las mismas.
- Valoración de las propiedades fisicoquímicas de la mezcla de compost de lodo de EDAR y paja de cereal y comparar estas con las propiedades del compost comercial analizado en el laboratorio.
- Obtener un potencial componente de un tecnosol, o una enmienda orgánica, apta para su empleo como sustrato en la restauración de áreas extractivas y degradadas.

## 3. Materiales y Métodos

### 3.1. Caracterización de los materiales

Para realizar este estudio se partió de varios residuos orgánicos: zahorra fina y gruesa, hojas de pino, paja de cereal, hojas de palmera, compost de EDAR, compost comercial, polvo de mármol, ramas y hojas de sarmiento, ramas y hojas de olivo. Estos materiales se mantuvieron en el invernadero de la universidad, en el campus de Elche, durante un periodo conveniente para eliminar su exceso de humedad. Previamente a la caracterización de estos materiales, los residuos de mayor tamaño, se procedió a triturarlos mediante batidora de vaso de una potencia adecuada, para facilitar su posterior manejo. Tras estas preparaciones los materiales en el laboratorio, fueron guardados y etiquetados en bolsas de plástico previo a su análisis, siguiendo la metodología y los protocolos estandarizados basados en las normas internacionales UNE, métodos oficiales y otros referenciados en la bibliografía científica.

Para concretar sobre qué materiales centrar el estudio se procedió a analizar diversos parámetros físicos y físico-químicos de los materiales seleccionados previamente. Dado que algunos de estos residuos variaban mucho en su tamaño se decidió triturarlos y tamizarlos a 1 y 2 milímetros para así tener datos de varios tamaños y, de paso, comprobar si había una diferencia significativa entre estos. Los materiales tratados fueron: hojas y ramas de olivo, hojas de palmera, hojas de pino y paja de cereal.



**Imágenes 1 y 2.** Residuos orgánicos (paja de cereal y compost de EDAR) utilizados.

Tras estos preparativos se llevaron a cabo los siguientes análisis según la metodología mencionada, para minimizar el error se repitió 5 veces cada procedimiento con cada muestra de cada material.

- **Densidad aparente (Da)** → Se determinó mediante la obtención del volumen que ocupa una masa conocida de residuo en un cilindro de medidas conocidas (UNE-EN 13040:2008).
- **Densidad real (Dr)** → Se calculó mediante el siguiente método: inicialmente se pesa una cantidad del residuo (m1), seguidamente se enrasa un picnómetro de 50 mL, se pesa el picnómetro con el agua (m2), finalmente se incorpora m1 al picnómetro y se vuelve a enrasar y pesar (m3). Estos datos se sustituyen en la siguiente fórmula:  $\frac{m1}{m2-m3}$  (UNE-EN ISO 17892-3:2015)\*.
- **Porosidad (%)** → Se expresa como el porcentaje de aire existente en el suelo y se obtiene a partir de la relación entre las densidades y con la siguiente fórmula:

$$1 - \left(\frac{Da}{Dr}\right) * 100$$

\*Este método tuvo que ser ligeramente modificado ya que muchos residuos flotaban: se introdujo una malla con una gasa en el picnómetro con la muestra (m3) con tal de impedir que el material (m1) flotara y falseara los datos.

Material		Da (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma$	Dr (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma$	P (%)	$\sigma$
Zahorra fina		1,607	0,051	2,68	0,03	40	1
Zahorra gruesa		1,549	0,055	2,66	0,04	41	2
Hoja de pino	>1mm	0,272	0,009	0,59	0,04	53	3
	<1mm	0,352	0,007	0,52	0,11	29	6
Paja de cereal	>2mm	0,088	0,004	0,28	0,03	65	3
	<2mm	0,121	0,004	0,20	0,04	39	11
Hoja palmera	>2mm	0,207	0,013	0,67	0,06	69	1
	<2mm	0,296	0,001	0,40	0,13	26	18
Polvo de mármol		1,083	0,031	1,73	0,11	37	4
Compost de EDAR		0,461	0,013	0,87	0,10	46	7
Compost comercial		0,420	0,011	0,68	0,07	35	3
Sarmiento de viña		0,340	0,003	0,67	0,08	48	6
Poda olivo	1-2mm	0,475	0,017	0,79	0,08	38	5
	<1mm	0,473	0,008	0,62	0,07	26	5

**Tabla 1.** Medias de densidad aparente, densidad real, porosidad y desviación estándar de cada material.



**Imágenes 3 y 4.** Medida de densidad real mediante método modificado de picnómetro.

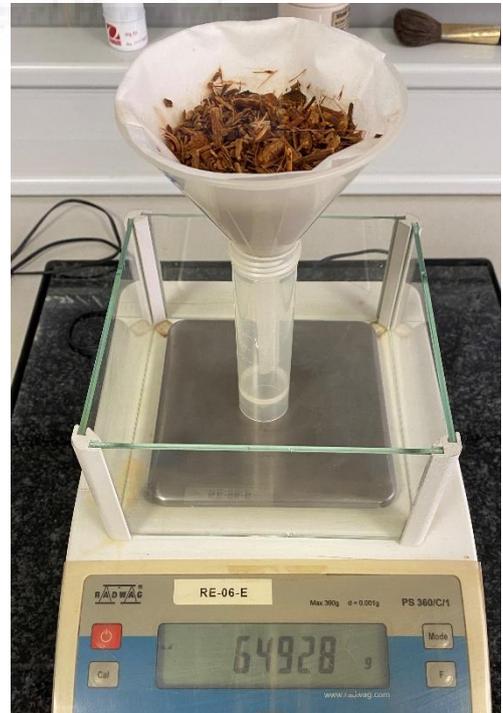
- **Conductividad eléctrica (CE)** → Medición en conductímetro de las muestras con agua destilada 1/5 (v/v) (UNE-EN 13038:2001).
  
- **pH** → Medición en pHmetro de las muestras en agua destilada.

Material		CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\sigma$	pH	$\sigma$
Zahorra fina		114	113	9,87	0,05
Zahorra gruesa		108	17	9,9	0,03
Hoja de pino	>1mm	318	33	5,55	0,04
Paja de cereal	>2mm	914	97	5,25	0,02
Hoja palmera	>2mm	2203	26	6,17	0,14
Polvo de mármol		547	20	9,59	0,02
Compost de EDAR		2352	49	8,62	0,01
Compost comercial		1200	27	4,83	0,12
Sarmiento de viña		694	27	5,89	0,07
Poda olivo	1-2mm	1263	17	5,22	0,31

**Tabla 2.** Medias de conductividad eléctrica, pH y desviación estándar de cada material.

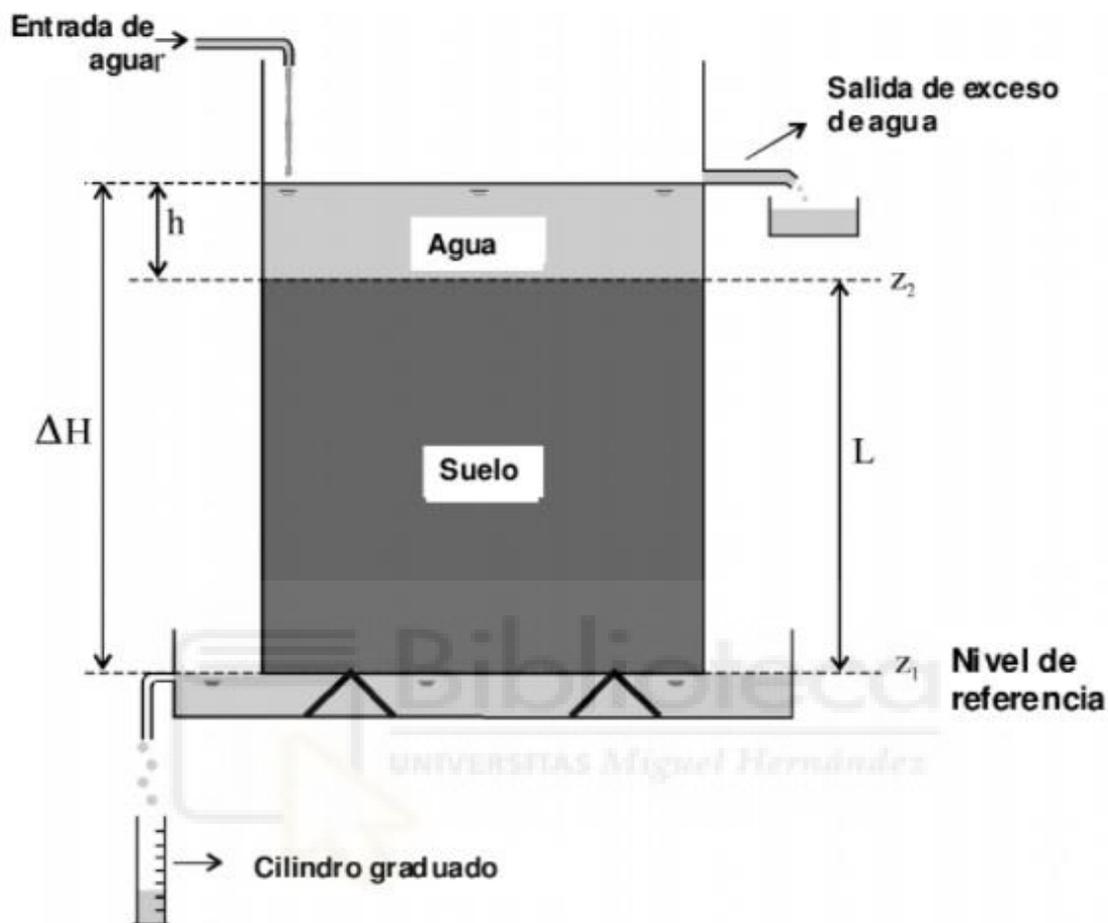
- **Capacidad de retención hídrica (CRH)** → Se calculó según la diferencia de masa entre el residuo seco y el saturado de agua después de 24 horas de drenaje libre.

$$\text{Percent soil water by weight} = \frac{\text{mass of water}}{\text{mass of oven dry soil}} \times 100\%$$



**Imágenes 5, 6, 7 y 8.** Proceso de determinación de capacidad de retención hídrica.

➤ **Conductividad hidráulica (Kh)** → Se determinó mediante el siguiente método:



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

Este consiste en un cilindro de medidas conocidas con una muestra conocida del residuo a estudiar, en este se verterá agua hasta que se alcance una carga constante dentro del cilindro y en la salida de este. En la salida mencionada anteriormente se coloca un cilindro o probeta graduada, con esta se anotará el volumen que no ha retenido el suelo en un tiempo concreto.

$$K_s = \frac{V}{A \Delta t \left[ \frac{(h+L)}{L} \right]}$$

Estos datos junto con las características del cilindro y de la muestra en el cilindro se sustituyen en la siguiente fórmula (Gabriels et al, 2014).



**Imagen 8.** Permeámetro modificado usado en este estudio.

- **Materia orgánica (MO)** → Se ha determinado según el contenido en cenizas, tras calcinación en el horno Mufla a 450 °C, ya que el contenido en materia orgánica se obtiene de la diferencia de masa por ignición (UNE-EN 13038:2001).

Material		CRH (%)	$\sigma$	Kh ( cm/h)	$\sigma$	MO (%)	$\sigma$
Zahorra fina		20,1	0,7	9926,1	4,2	-	-
Zahorra gruesa		11,2	0,7	931,45	0,04	-	-
Hoja de pino	>1mm	82	12	-	-	-	-
	<1mm	202	22	39,83	0,16	91,9	0,3
Paja de cereal	>2mm	80	18	-	-	-	-
	<2mm	403	43	23,95	0,12	94,9	1,8
Hoja palmera	>2mm	84	7	-	-	-	-
	<2mm	134	11	24,37	0,21	79	24
Polvo de mármol		39	1	0,69	0,02	-	-
Compost de EDAR		84	11	289,79	0,16	58,9	1,1
Compost comercial		105	40	239,38	0,49	90,9	0,9
Sarmiento de viña		62	2	-	-	94,0	0,5
Poda olivo	1-2mm	77	9	-	-	-	-
	<1mm	161	19	68	6	94,1	0,1

**Tabla 3.** Medias de capacidad de retención hídrica, conductividad hidráulica, materia orgánica y desviaciones estándar de los materiales estudiados.

### 3.2. Materiales escogidos para las mezclas

Tras estos análisis se concluyó que una de las mezclas que debían ser estudiadas era la constituida por la paja de cereal y el compost de lodo de EDAR, ya que podría mejorarse dos características del compost de biosólido, en el sentido de disminuir sus valores: el pH y la conductividad eléctrica. Este estudio se centró, por tanto, en las mezclas de paja y compost de EDAR.

### 3.3. Preparación y tratamiento de las mezclas

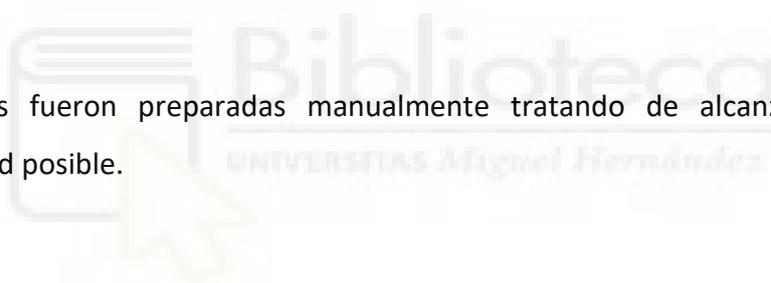
Para la preparación de las mezclas se llevaron a cabo los mismos procesos expuestos anteriormente: triturado y posterior tamizado a 2mm en el caso de la paja, mientras que no fue necesario triturar las muestras de compost de EDAR, ya que una simple disgregación con la mano nos permitió romper los componentes más gruesos.

Una vez listos los residuos se establecieron 5 niveles de mezcla según las proporciones en masa de los dos residuos:

Residuo	Porcentaje paja/compost				
Paja de cereal	0	25	50	75	100
Compost de EDAR	100	75	50	25	0

**Tabla 4.** Proporciones de las mezclas según porcentaje den masa.

Estas mezclas fueron preparadas manualmente tratando de alcanzar la mayor homogeneidad posible.



### 3.3.1. Caracterización de las mezclas

Una vez preparadas las mezclas se procedió a estudiar sus propiedades físicas y físico-químicas, mediante los procedimientos que se han expuesto en el punto 3.1.:

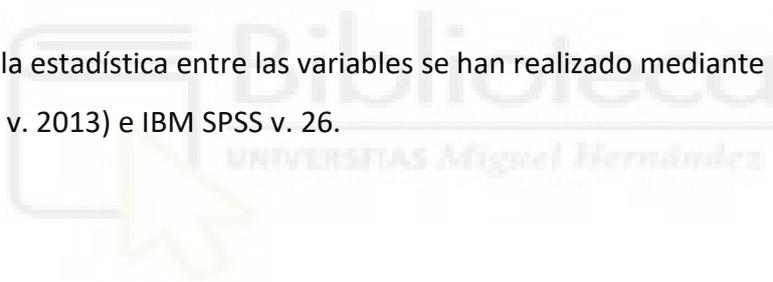
- Densidad aparente
- Densidad real
- Porosidad
- Retención hídrica
- Conductividad eléctrica
- pH
- Conductividad hidráulica
- Materia orgánica



### 3.4. Métodos analíticos

Se ha determinado la media y la desviación estándar (estadística descriptiva) para los resultados obtenidos. Además, para poder determinar si existen diferencias significativas entre los tratamientos al finalizar el ensayo, se ha procedido a realizar el análisis de varianza (ANOVA) de un factor. Con el fin de no repetir al pie de todas las tablas los símbolos utilizados para la representación estadística, la significación queda expresada en las tablas de datos de tal manera que los valores para una misma columna, son diferentes para una probabilidad del 95% si tienen letras distintas. El análisis de varianza queda representado por el valor de la F y la simbología \*, \*\* y \*\*\* para expresar significancia al 95%, 99% y 99,9% respectivamente. En el caso de no haber significancia estadística se indica "ns". Además se realizó el teste de Levene para la homogeneidad de la varianza.

Los cálculos y la estadística entre las variables se han realizado mediante los programas EXCEL (Office, v. 2013) e IBM SPSS v. 26.



## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Densidad real

En la tabla 5 se muestran los resultados de la densidad real para cada porcentaje en masa de las mezclas de paja de cereal y compost de EDAR (0 - 100, 25 - 75, 50 - 50, 75 - 25, 100 - 0) además de la desviación estándar.

La densidad real viene dada por la relación existente entre el peso de los sólidos del suelo y el volumen ocupado por los mismos, en el cuál no se incluye el volumen ocupado por los poros, por lo que será un parámetro utilizado para la porosidad.

Se puede observar que la densidad real disminuye conforme el porcentaje de paja aumenta mientras que esta disminuye al aumentar el porcentaje de compost. Los valores son estadísticamente diferente entre todas las mezclas.

Mezcla paja - compost (%)	Dr (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma$
0 - 100	0,87	0,10
25 - 75	0,71	0,07
50 - 50	0,54	0,05
75 - 25	0,39	0,02
100 - 0	0,22	0,02
F	87,6 ***	

**Tabla 5.** Densidad real (g/cm<sup>3</sup>) de las mezclas paja-compost.

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 (a y b) son estadísticamente iguales a  $p=0,05$ .

## 4.2. Densidad aparente

A partir de las mezclas empleadas en la obtención de la densidad real, obtendremos en las mismas proporciones de residuo respecto a la mezcla total, la densidad aparente. La densidad aparente viene dada por la relación entre el peso de los sólidos del suelo y el volumen total o aparente del mismo. Cabe esperar que al igual que ocurre con la densidad real, que conforme se aumente la proporción de residuo orgánico el valor de densidad aparente disminuya.

Se puede observar que la densidad aparente disminuye conforme el porcentaje de paja aumenta mientras que esta disminuye al aumentar el porcentaje de compost. La influencia de los tratamientos tiene un alto grado de significación estadística en los resultados medios obtenidos.

Mezcla paja - compost (%)	Da (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma$
0 - 100	0,46	0,01
25 - 75	0,42	0,01
50 - 50	0,32	0,01
75 - 25	0,21	0,01
100 - 0	0,11	0,01
<b>F</b>	<b>1456 ***</b>	

**Tabla 6.** Densidad real (g/cm<sup>3</sup>) de las mezclas paja-compost.

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 (a y b) son estadísticamente iguales a  $p=0,05$ .

### 4.3. Porosidad

Una vez conocidos los valores de densidad real y densidad aparente, con ello podremos obtener datos sobre la porosidad de las mezclas. La porosidad representa el porcentaje de huecos existentes respecto al volumen total del subproducto orgánico configurado, estos huecos pueden ser microporos o microporos. Como ya sabemos un aumento de la materia orgánica aplicada al suelo es capaz de modificar sus propiedades físicas y, por lo tanto, también su porosidad.

En el caso de la porosidad no se puede observar ninguna tendencia creciente o decreciente clara conforme varían los porcentajes de la mezcla, esta se mantiene más o menos en los mismos niveles en todas las mezclas. La estabilidad en este parámetro es lógica, si tenemos en cuenta que ambas densidades evolucionan en el mismo sentido.

Mezcla paja - compost (%)	Porosidad (%)	$\sigma$
0 - 100	46,2 ab	7,1
25 - 75	39,3 ab	8,0
50 - 50	41,9 a	6,3
75 - 25	44,4 ab	2,9
100 - 0	52,7 b	3,4
F	3,76 *	

**Tabla 7.** Porosidad (%) de las mezclas paja-compost.

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 (a y b) son estadísticamente iguales a  $p=0,05$ .

#### 4.4. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica saturada está estrechamente relacionada con la porosidad de los materiales analizados, aunque en el caso de mezclas, esta relación no es tan proporcional como podía esperarse, dado que hay interacciones espaciales entre ambos materiales que afectan al movimiento vertical del agua.

En el caso de la conductividad hidráulica podemos apreciar una clara línea ascendente desde la mezcla sin paja hasta el 100% de paja en la mezcla. Esto nos indica que la adición de paja de cereal implica un aumento considerable de la permeabilidad de agua en las mezclas ensayadas, y potencialmente en el tecnosuelo que se pudiera formar con las mismas, mientras que al añadir compost de EDAR se reduce esta permeabilidad.

Mezcla paja - compost (%)	Kh (cm/h)	$\sigma$
0 - 100	284 a	4
25 - 75	475 a	9
50 - 50	885	7
75 - 25	1401	112
100 - 0	2079	337
F	<b>83,9 ***</b>	

**Tabla 8.** Conductividad hidráulica (cm/h) de las mezclas paja-compost.

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 (a y b) son estadísticamente iguales a  $p=0,05$ .

#### 4.5. Retención hídrica

La retención hídrica es el agua contenida en el suelo, o en determinado componente del mismo, disponible para las plantas. Es el agua contenida en el suelo comprendida entre el índice de marchitez y la capacidad de campo.

Al igual que en la conductividad hidráulica, en la capacidad de retención hídrica podemos apreciar una clara línea ascendente desde la mezcla sin paja hasta el 100% de paja en la mezcla. Esto nos indica que la adición de paja de cereal implica un aumento considerable de la retención de agua en las mezclas binarias consideradas. Esto implica que la adición de las mezclas con buena retención a un suelo que presente falta de agua, puede ayudar a retener el agua y la humedad en este suelo.

Mezcla paja - compost (%)	CRH (%)	$\sigma$
0 - 100	84,4 a	11,6
25 - 75	98,7 ab	8,0
50 - 50	107,1 b	6,4
75 - 25	139,4	5,5
100 - 0	228	14
<b>F</b>	<b>179***</b>	

**Tabla 9.** Capacidad de retención hídrica (CRH) de las mezclas paja-compost.

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 (a y b) son estadísticamente iguales a  $p=0,05$ .

#### 4.6. Conductividad eléctrica

Podemos observar que la conductividad eléctrica y, por lo tanto, la concentración en sales aumenta a la vez que el porcentaje de compost de biosólido en las mezclas. La conductividad eléctrica nos indica la concentración de sales solubles presente en los residuos, la salinidad tiene una influencia directa en la actividad microbiana y en la cantidad de iones disponibles, un exceso de esta puede ser perjudicial para el suelo. En cambio, si el tecnosuelo requerido para una zona tiene que tener cierta salinidad, esta se podrá regular fácilmente con la concentración de paja.

Mezcla paja - compost (%)	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\sigma$
0 - 100	2352,66	51
25 - 75	2141,99	82
50 - 50	1997,66	71
75 - 25	1540,40	73
100 - 0	1070,00	66
<b>F</b>	<b>274***</b>	

**Tabla 10.** Capacidad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) de las mezclas paja-compost.

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 (a y b) son estadísticamente iguales a  $p=0,05$ .

## 4.7. pH

El pH tiene influencia directa sobre la disponibilidad de nutrientes del suelo, esta disponibilidad varía según el nutriente. La adición de estas mezclas se tendrá que hacer en función de la vegetación presente en la zona, los usos que se le quiera dar al tecnosuelo y los nutrientes presentes y necesarios.

Por lo general, un pH más ácido (4-6) permite una mejor movilidad de los nutrientes y una mayor disponibilidad de estos para las plantas.

En la tabla 11 podemos ver el claro y significativo efecto de la incorporación de la dosis de paja de cereal sobre el compost de lodo. La paja hace disminuir el pH de las mezclas por debajo de 7, hecho importante para la movilización de los nutrientes y mejora de las características de los suelos enmendados con estas mezclas o los tecnosuelos formados a partir de estas.

Mezcla paja - compost (%)	pH	$\sigma$
0 - 100	8,62	0,01
25 - 75	7,78	0,09
50 - 50	7,43	0,1
75 - 25	6,89	0,09
100 - 0	5,36	0,13
<b>F</b>	<b>908***</b>	

**Tabla 11.** pH de las mezclas paja-compost.

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 (a y b) son estadísticamente iguales a  $p=0,05$ .

#### 4.8. Materia orgánica y humedad

La materia orgánica es indispensable para el buen funcionamiento del suelo: aporta gran cantidad de elementos esenciales para las plantas (NPK), almacena gran cantidad de humedad, lo que se traduce en más agua disponible para las plantas y mejora la estructura del suelo.

En la tabla 12 se aprecia el aumento significativo de la MO total en las mezclas que tienen más paja de cereal, hecho importante ligado al secuestro de C en el medio de cultivo que reciba la enmienda orgánica o el tecnosuelo preparado a partir de las mismas.

Mezcla paja - compost (%)	M.O. (%)	$\sigma$
0 - 100	59	1,1
25 - 75	68	1,0
50 - 50	77	1,1
75 - 25	86	1,4
100 - 0	95	1,9
F	??? no está en resultados	

**Tabla 12.** Materia orgánica (%) de las mezclas paja-compost.

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 (a y b) son estadísticamente iguales a  $p=0,05$ .

#### 4.9. Mezclas vs compost comercial

Parámetro	Porcentaje mezcla paja - compost					Compost comercial
	0 - 100	25 - 75	50 - 50	75 - 25	100 - 0	
Da (g/cm <sup>3</sup> )	0,46	0,42	0,31	0,21	0,11	0,42
Dr (g/cm <sup>3</sup> )	0,87	0,71	0,55	0,39	0,22	0,673
P (%)	46,22	39,28	41,89	44,40	52,74	35,01
CRH (%)	84,37	98,65	107,13	139,40	228,06	105,37
CE (μS/cm)	2352,67	2141,00	1997,67	1540,40	1070,00	1200,26
pH	8,62	7,78	7,43	6,89	5,36	4,63
Kh (cm/h)	284,28	475,22	884,56	1400,75	2079,01	239,38
MO (%)	59,00	68,00	76,99	85,99	94,99	90,99

**Tabla 13.** Comparación entre las propiedades estudiadas de los porcentajes de la mezcla y el compost comercial.

Como se puede observar en la tabla 13, varios valores de las mezclas consideradas en el presente estudio se asemejan a los del compost comercial analizado como referencia y, en otros casos, estos son mejores que en dicho compost.

Por ejemplo, en la mezcla 25 – 75, 3 de los 4 parámetros físicos son similares por lo que se podría considerar que esta mezcla tiene las mismas características.

Por otro lado, el parámetro de la conductividad eléctrica se puede considerar “algo peor” porque la salinidad suele ser negativa en los suelo, aunque un estudio más detallado de los iones que contribuyen al valor de la CE, aclararían esta suposición.

## 5. Conclusiones

Las principales conclusiones obtenidas de los datos determinados en este estudio son:

- La utilización de residuos orgánicos como la paja de cereal y el compost de EDAR como principales componentes de una enmienda orgánica o de un tecnosuelo proporcionan características muy interesantes para el uso de estos.
- Las diferentes mezclas de estos dos residuos proporcionan una buena variabilidad en las características del tecnosuelo, con el consiguiente abanico de posibles aplicaciones.
- Al compararlo con un compost comercial, algunas mezclas tienen, a priori, mejores características físicas que el comercial (densidad aparente, densidad real, porosidad y capacidad de retención hídrica). Mientras que la mezcla 100% paja tiene mejores características químicas, considerando las analizadas.
- El uso de residuos orgánicos como la paja de cereal y el compost de EDAR como tecnosuelos o enmiendas orgánicas suponen un acercamiento a la economía circular que, además, tiene un bajo coste y una elaboración sencilla.

## 6. Bibliografía

**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.

**AENOR. UNE- EN ISO 17892-3:2015.** Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 3: Determinación de la densidad de las partículas.

**Banegas, V.; Moreno, J.L; Moreno, J.I.; García, C.; León, G.; Hernández, T.; 2007.** Composting anaerobic and aerobic sewage sludges using two proportions of sawdust, Waste Management, Volume 27, Issue 10, 2007.

**Banegas, V., Moreno, JI. , León, G., Gracia, C. y Hernánde, T. 2007.** Differences between anaerobic and aerobic sewage sludges during composting. Waste Management, 1317-1327.

**Barbecho, J. y Calle, J. 2012.** Caracterización de la conductividad hidráulica de los suelos de la subcuenca del Río Tarqui. Tesis Ingeniería Civil. Universidad de Cuenca, Cuenca.

**Baragaño, D., Gallego, J. L. R., Baleriola, G., & Forján, R. (2020).** Effects of different in situ remediation strategies for an As-polluted soil on human health risk, soil properties, and vegetation. *Agronomy*, 10, 759

**Burbano-Orjuela, H. (2016).** El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117-124.

**Deeb, M., Groffman, P., Joyner, J. L., Lozefski, G., Paltseva, A., Lin, B., Mania, K., Cao, D. L., McLaughlin, J., Muth, T., Prithiviraj, B., Kerwin, J., & Cheng, Z. (2018).** Soil and microbial properties of green infrastructure stormwater management system. *Ecological Engineering*, 125, 68–75

**Deeb, M., Groffman, P. M., Blouin, M., Egendorf, S. P., Vergnes, A., Vasenev, V., Cao, D. L., Walsh, D., Morin, T., & Se´re´, G. (2020).** Using constructed soils for Green infrastructure –challenges and limitations. *The Soil*, 6, 413–434

**Donald Gabriels, Deyanira Lobo L.y Mansonia Pulido M. (2014)** Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos. Universidad de Gante, Bélgica. Universidad Central de Venezuela.

**Espinoza, Indira & Carrillo Zenteno, Manuel Danilo & Cargua Chávez, Jessica & Moreiral, Virginia & Solarte, Karla & Intriago, Fátima. (2018).** Propiedades físicas del suelo en diferentes sistemas agrícolas en la provincia de Los Ríos, Ecuador. *Temas Agrarios*. 23. 177. 10.21897/rta.v23i2.1301.

**FAO.** Definiciones, Portal de Suelos de la FAO.

<http://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>

Revised world soil charter. Ed. FAO, Roma (2015).

**García, C. (2008).** Enmiendas orgánicas para suelos basadas en residuos orgánicos. Academia de Ciencias de la Región de Murcia.

**Hartmann, R. 2000.** Soil Physics. Lecture notes, Dept of Soil Management and Soil Care, Ghent University, Belgium.

**Ingaramo, O. E., Paz Ferreiro, J., Mirás-Avalos, J. M., & Vidal Vázquez, E. (2007).** Caracterización de las propiedades generales del suelo en una parcela experimental con distintos sistemas de laboreo.

**INTAGRI. 2017.** La Conductividad Eléctrica del Suelo en el Desarrollo de los Cultivos. Serie Suelos. Núm. 26. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 5 p.

**IUSS. Working Group WRB. (2015).** Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos. Roma: FAO.

**Li, G., Sun, G. X., Ren, Y., Luo, X. S., & Zhu, Y. G. (2018).** Urban soil and human health: a review. *European Journal of Soil Science*, 69, 196–215

**Miralles, I. 2006.** Calidad de Suelos en Ambientes Calizos Mediterráneos: Parque Natural de Sierra María-Los Vélez. Tesis doctoral. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Universidad de Granada.

**MALAGÓN, D.; MONTENEGRO, G. H. 1990.** Propiedades físicas de los suelos Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá. Colombia.

**Navarro-Pedreño, J.; Moral, R.; Gómez, L.; Mataix, J. (1995).** Residuos Orgánicos y Agricultura. Ed. SP Universidad de Alicante, Alicante.

**Nigussie, A.; Kuyper, T.W.; Neergaard, A. (2015).** Agricultural waste utilisation strategies and demand for urban waste compost: Evidence from smallholder farmers in Ethiopia. *Waste Manag.* 2015, 44, 82–93.

**Patience Afi Seglah, Yajing Wang, Hongyan Wang and Yuyun Bi. (2019)**

Estimation and Efficient Utilization of Straw Resources in Ghana.

Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences and Agricultural Information Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China.

**Rodríguez-Espinosa, T.; Navarro-Pedreño, J.; Gómez-Lucas, I.; Jordán-Vidal, M. M.; Bech-Borras, J.; Zorpas, A. A. (2021).** Urban areas, human health and technosols for the green deal.

**SECS.** Diccionario multilingüe de la ciencia del suelo. Origen del suelo y organizaciones edáficas. <https://cit.iec.cat/DMCSE/default.asp>

**UNESCO/WMO Glosario Internacional de Hidrología**

<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000221862>