

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL



Desarrollo de nuevos sustratos a base de compost y biochar para la propagación y producción de *Rosmarinus officinalis* L. en vivero profesional

TRABAJO FIN DE GRADO EN: **INGENIERÍA FORESTAL Y
DEL MEDIO NATURAL**

ALUMNA: **LUISA LIU XU**

TUTORA: **ROSA MARIA BELDA NAVARRO**

COTUTOR: **FERNANDO FORNES SEBASTIA**

Curso Académico: 2014-2015

VALENCIA, JULIO DE 2015



FICHA RESUMEN

- **Título del trabajo:** Desarrollo de nuevos sustratos a base de compost y biochar para la propagación y producción de *Rosmarinus officinalis* L. en vivero profesional
- **Autor:** Luisa Liu Xu
- **Localidad y fecha:** Valencia, Julio de 2015
- **Tutor académico:** Rosa María Belda Navarro
- **Cotutor académico:** Fernando Fornes Sebastia.
- **Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural**
- **Licencia *Creative Commons*:** Reconocimiento – NoComercial – SinObraDerivada (by-nc-nd). Esta licencia obliga a la mención de la autoría de la obra. Permite la reproducción, distribución y comunicación pública de la obra siempre que no sea con fines comerciales. No permite la elaboración de obras derivadas.

- **Resumen:**

El compostaje como valorizador de residuos orgánicos ha sido ampliamente estudiado en los últimos años. El compost resultante del proceso de compostaje se utiliza en agricultura como enmienda orgánica del suelo o como componente de sustrato para cultivo en contenedor. En este último caso presenta especial interés como sustituto de la turba. El biochar o carbón vegetal proviene de la carbonización de material vegetal en bajas concentraciones de oxígeno y se está proponiendo actualmente en agricultura como enmienda de suelo por ser muy estable y porque retiene gases de efecto invernadero. El objetivo de este trabajo es el estudio de dos composts y un biochar como componentes de sustrato de cultivo en contenedor: un compost de gallinaza, un compost de gallinaza co-compostada con biochar procedente de la poda de encina y ese mismo biochar. El cultivo escogido fue la especie autóctona mediterránea *Rosmarinus officinalis* L. Se realizaron mezclas en proporciones diferentes con compost de gallinaza, compost de gallinaza co-compostada con biochar, biochar y turba. Se determinaron las características físicas, físico-químicas, químicas y biológicas de todas ellas, atendiendo a las propiedades de mayor interés para el cultivo en contenedor. Finalmente se realizó la evaluación agronómica en vivero, con la especie vegetal elegida, realizando un ensayo de enraizamiento de esquejes y un ensayo de crecimiento de planta. Los resultados demostraron que no había grandes diferencias en cuanto a propiedades físicas entre los dos composts de partida. Mezclando el compost con biochar se mejoraron propiedades físicas como la aireación o la contracción, pero para mejorar otros parámetros se hacía necesaria la dilución con altas concentraciones de turba. El biochar, a diferencia de los dos composts, no resultó fitotóxico a altas concentraciones y mostró capacidad de secuestrar CO₂ atmosférico. Los sustratos con baja proporción de compost incrementaron el crecimiento de la planta respecto a los que contenían turba pura. En cuanto al biochar, mejoró el enraizamiento de estacas respecto al control de turba, lo que indicaría que pudiera contener estimuladores del crecimiento.

- **Palabras clave:** biochar, compost, gallinaza, cultivo en contenedor

- **Summary:**

Composting as a means to reclaim organic waste has been widely studied in the recent years. The product of composting or compost is used in agriculture as organic soil amendment or as substrate constituent for containerized plant growth. In the latter case it has been shown of special interest as peat substitute. Biochar is obtained by pyrolysis of green material at low oxygen concentration and it is being proposed as soil amendment in agriculture for its stability and for the fact that it can sequester greenhouse-effect gases. The aim of this work is to assess two composts and a biochar as substrate constituents: one compost from poultry manure, another from poultry manure co-composted with biochar from oak pruning waste and the biochar from the same batch that had been used in the co-composting process. The plant chosen for the assessment was the Mediterranean *Rosmarinus officinalis* L. The poultry manure compost, the poultry manure compost co-composted with biochar, the biochar and *Sphagnum* peat were mixed at different proportions. The physical, physicochemical, chemical and biological properties of the mixes were determined, focusing on those of interest for containerized plant growth. Finally the agronomical assessment of the materials was carried out by growing rosemary in a nursery. Two assays were performed: cutting rooting and plant growth. Results showed that the properties of both composts did not largely differ. Mixing the poultry manure compost with biochar improved physical properties such as air volume and shrinkage, however for the improvement of other properties large proportions of peat were needed in the mix. Biochar, as opposed to both composts, was not phytotoxic at high concentrations and showed the ability to sequester atmospheric CO₂. Substrates with low compost proportion increased plant growth with respect to those containing pure peat. Besides, biochar improved cutting rooting with respect to peat, which might indicate that it contained growth stimulators.

- **Keywords:** biochar, compost, poultry manure, containerized plant growth

AGRADECIMIENTOS

Deseo aprovechar este apartado para expresar mi profunda gratitud a todos lo que han permitido que el presente trabajo se haya llevado a cabo.

A mi tutora Rosa Belda y a mi cotutor Fernando Fornes. Por su incondicional entrega, esfuerzo y dedicación. Por la libertad de trabajo que me han concedido y por la confianza depositada en mí. Y sobre todo, por brindarme esta oportunidad y experiencia única.

A Antonio Lidón, por el interés y apoyo ofrecido durante mi período de beca de colaboración, así como al resto del departamento de Química que me ha ayudado tan caritativamente, especialmente la técnico Joana Oliver.

A mis compañeros de clase, sobre todo a E., P., B., y R., por aguantar mis inseguridades y brindarme ánimo.

A mi gente más cercana y querida, por motivarme y confiar siempre en mis posibilidades.

A todos los que no he mencionado y han hecho posible mi llegada al culmen de estos cuatro años de estudio, sean profesores, amigos, libros, música...

Porque no sería nadie sin vuestro apoyo. Muchísimas gracias.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. SUSTRATOS	1
1.1.1. Tipos de sustratos	3
1.1.2. Problemática de la turba	3
1.1.3. Composts	4
1.1.4. Biochar	5
2. OBJETIVOS	7
3. MATERIAL Y MÉTODOS	8
3.1. MATERIALES A ESTUDIAR	8
3.1.1. Materiales puros	8
3.1.2. Mezclas	8
3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	9
3.2.1. Propiedades físicas	9
3.2.2. Propiedades físico-químicas y químicas	11
3.2.3. Propiedades biológicas	13
3.3. EVALUACIÓN AGRONÓMICA	15
3.3.1. Enraizamiento	15
3.3.2. Crecimiento	15
3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS	15
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16
4.1. CARACTERIZACIÓN DE SUSTRATOS. PROPIEDADES FÍSICAS, FÍSICO-QUÍMICAS Y QUÍMICAS.	16
4.1.1. Granulometría	16
4.1.2. Características físicas, físico-químicas y químicas	18
4.2. CARACTERIZACIÓN DE SUSTRATOS. PROPIEDADES BIOLÓGICAS.	24
4.2.1. Bioensayos de fitotoxicidad	24
4.2.2. Respirimetría	25
4.3. EVALUACIÓN AGRONÓMICA	28
4.3.1. Ensayo de enraizamiento de estaquillas de romero	28
4.3.2. Ensayo de crecimiento en romero	31
4.3.3. Composición mineral de la hoja	33
5. CONCLUSIONES	36
6. BIBLIOGRAFÍA	16

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 3.1.** Esquema del procedimiento seguido en la determinación de la densidad aparente (DA) (Noguera, 1999). **10**
- Figura 4.1.** Distribución granulométrica del compost de gallinaza (G), el compost de gallinaza co-compostada con biochar (GB), la turba (T), el biochar (B), el sustrato comercial de enraizamiento (SR), el sustrato comercial de crecimiento (SC) y sus mezclas. La relación de mezcla se indica en (%v:v)..... **17**
- Figura 4.2.** Índices de germinación según sustrato, en el bioensayo con berro (*Lepidium sativum* L.): compost de gallinaza (G), compost de gallinaza co-compostada con biochar (GB), turba (T), biochar (B), sustrato comercial de enraizamiento (SR) y sustrato comercial de crecimiento (SC) en estado puro y diluido al 25% **24**
- Figura 4.3.** Índices de germinación en el bioensayo con lechuga (*Lactuca sativa* L.): compost de gallinaza (G), compost de gallinaza co-compostada con biochar (GB), turba (T), biochar (B), sustrato comercial de enraizamiento (SR) y sustrato comercial de crecimiento (SC) en estado puro y diluido al 25%..... **25**
- Figura 4.4.** Consumo acumulado de O₂ de los diferentes materiales estudiados: compost de gallinaza (G), compost de gallinaza co-compostada con biochar (GB), turba (T), biochar (B) y sustrato comercial de enraizamiento (SR) **26**
- Figura 4.5.** Producción acumulada de CO₂ de los diferentes materiales estudiados: compost de gallinaza (G), compost de gallinaza co-compostada con biochar (GB), turba (T), biochar (B) y sustrato comercial de enraizamiento (SR) **26**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Intervalos óptimos de las propiedades físicas de los sustratos de cultivo (<i>Carmona y Abad, 2008</i>).	2
Tabla 1.2. Intervalos óptimos de las características físico-químicas y químicas de los sustratos de cultivo (<i>Carmona y Abad, 2008</i>)	3
Tabla 3.1. Composición en porcentaje de volumen (% v:v) de las mezclas realizadas	8
Tabla 4.1. Características físicas, fisico-químicas y químicas de los sustratos a base de compost de gallinaza (G) o gallinaza co-compostada con biochar (GB), mezclados con turba.....	19
Tabla 4.2. Características físicas, fisico-químicas y químicas de los sustratos a base de biochar (B) y turba (T) mezclados con compost de gallinaza (G).....	22
Tabla 4.3. Relación molar O ₂ /CO ₂ para los materiales puros ensayados: compost de gallinaza (G), compost de gallinaza co-compostada con biochar (GB), turba (T), biochar (B) y sustrato comercial de enraizamiento (SR). Se incluye el coeficiente de determinación R ² de la regresión lineal entre la producción de CO ₂ y consumo de O ₂ durante la incubación.	27
Tabla 4.4. Efecto de los sustratos a base de compost de gallinaza (G) y gallinaza co-compostada con biochar (GB) mezclados con turba (T) sobre los parámetros de enraizamiento de <i>Rosmarinus officinalis</i>	28
Tabla 4.5. Efecto de los sustratos a base de biochar (B) y turba (T) mezclados con compost de gallinaza (G) sobre los parámetros de enraizamiento de <i>Rosmarinus officinalis</i>	30
Tabla 4.6. Efecto de los sustratos a base de compost de gallinaza (G) y gallinaza co-compostada con biochar (GB) mezclados con turba (T) en el crecimiento de <i>Rosmarinus officinalis</i>	31
Tabla 4.7. Efecto de los sustratos a base de biochar y turba mezclados con compost de gallinaza sobre los parámetros en el crecimiento de <i>Rosmarinus officinalis</i>	32
Tabla 4.8. Nutrientes (% del peso seco) en hoja de <i>Rosmarinus officinalis</i> cultivado en sustrato a base de compost de gallinaza (G) o de gallinaza co-compostada con biochar (GB) mezclados con turba	33
Tabla 4.9. Nutrientes (% del peso seco) en hoja de <i>Rosmarinus officinalis</i> cultivado en sustrato a base de compost de gallinaza mezclado con biochar (B) y turba (T)	34
Tabla 4.10. Contenido de nutrientes minerales foliares en <i>Rosmarinus officinalis</i> cultivado en contenedor en período estival. Extracto de “Plant Analysis Handbook II. A practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide” (<i>Mills et al., 1993</i>)	35

1. INTRODUCCIÓN

Un vivero es una superficie de terreno dedicada a la producción de plantas en alta densidad, con objetivos de repoblación forestal, ornamentales, hortofrutícolas... Estas plantas deben poseer unas condiciones morfológicas estrictas y producirse en cantidades importantes, para lo que se aplican técnicas de cultivo específicas. Todo vivero tiene como base producir plantas, según los objetivos fijados, con la máxima calidad y el menor coste posible.

El cultivo de planta en vivero puede ser a raíz desnuda o en contenedor, siendo éste último el que permite mantener íntegro el sistema radical durante todo el proceso de cultivo, transporte y plantación. En el cultivo en contenedor o en envase se utilizan recipientes que, llenos de sustrato, permiten la producción de plantas en condiciones adecuadas en un ambiente mínimamente controlado. El envase es el parámetro más influyente en la planta, puesto que aporta el sustrato sobre el que crecer, además de determinar su tamaño y la formación de cepellón y sistema radical.

En el presente trabajo se trata una especie autóctona de la cuenca Mediterránea muy frecuente en las zonas bajas de clima cálido, el romero (*Rosmarinus officinalis* L.). Tal y como indica López (2007), el romero es un arbusto siempre verde, de 0.5-1.5 m de altura normalmente, que se ramifica profusamente. Presenta hojas en abundancia, densas, estrechas y casi cilíndricas, correosas, de borde entero y prácticamente sin pecíolo, que pueden medir hasta 4 cm de largo. Presenta flores en ramilletes axilares, desde azul claro, rosa o blanquecinas y se puede multiplicar por esqueje. Se trata de una especie que forma parte de los matorrales que se desarrollan en sitios secos y soleados, principalmente en ambiente de encinar: etapas degradadas por tala o quema o laderas pedregosas y erosionadas.

Puede considerarse su uso para repoblaciones, siempre bajo los objetivos y condiciones concretas de cada repoblación en particular. Tiene mayor función en las repoblaciones de índole protector, ya que es de conocimiento general que resulta más favorable la elección de especies mixtas y una visión futura de formación de estrato arbóreo y sotobosque con el uso de especies autóctonas, puesto que permitirá una mayor estabilidad a largo plazo.

La elección de trabajar con romero se debe a su carácter potencial para ser utilizado en diferentes actividades en nuestra zona (repoblación, ornamental, industria de aceites esenciales...). Es una especie arbustiva que además no requiere muchos años para poder obtener datos de su crecimiento, facilitando el período de estudio.

1.1. SUSTRATOS

El sustrato, suelo artificial o medio de cultivo, se define como el soporte físico, material sólido distinto de suelo, para el cultivo y protección del sistema radicular de la planta. La calidad del sustrato es un factor principal para el éxito del cultivo en contenedor: El sustrato debe almacenar y suministrar agua y nutrientes y permitir la aireación de las raíces. Las plantas cultivadas en contenedor disponen de un volumen limitado donde desarrollar su sistema radical lo que obliga a efectuar riegos frecuentes y una programación adecuada de la fertilización (Abad et al., 2005; Biel et al., 2006). Los sustratos están regulados por el Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo, así como por Órdenes Ministeriales recogidas en el BOE y normas UNE-EN. La normativa señala las características que debe reunir el sustrato para permitir el desarrollo de plantas de manera eficaz. Su uso no debe producir efectos perjudiciales para la salud ni el medio ambiente y no debe ser portador de plagas ni de patógenos causantes de enfermedades de plantas. Además la normativa dispone los métodos adecuados de toma de muestras, de análisis, y de ensayo, para comprobar sus características y cualidades.

Tal y como indican Fornes y Belda (2014), el cultivo en sustrato se ha desarrollado en las últimas décadas por las siguientes razones: la necesidad de transportar las plantas de un lugar a otro, la de soslayar problemas de salinidad, enfermedades y agotamiento del suelo cuando se realizan cultivos intensivos de manera continuada, y la de controlar el entorno radicular en lo que se refiere a agua y nutrientes en la intensificación actual de la producción. Así, se utilizan sustratos en la producción intensiva de hortalizas, en la producción de planta ornamental en contenedor, en la producción de semilleros de planta hortícola y en la producción de plantones forestales.

Un sustrato debe ser caracterizado en relación a sus propiedades físicas, físico-químicas, químicas y biológicas antes de ser usado. Dichas propiedades afectarán al manejo del cultivo (tipo de contenedor, riego y fertilización) y su determinación está estandarizada por normas UNE-EN.

Las propiedades físicas son de capital importancia y abarcan necesariamente: granulometría, densidad aparente, densidad real o de partícula, volumen de agua, volumen de aire, porosidad total y capacidad de retención de agua. Las características físico-químicas y químicas responden a las transferencias de materia entre el sustrato y la solución del mismo, como son reacciones de intercambio de iones (físico-química) o las reacciones de disolución de los constituyentes minerales (químicas). Las características químicas normalizadas son: pH, conductividad eléctrica, contenido en materia orgánica y mineral y elementos minerales solubles (Abad *et al.*, 2005). En las tablas 1.1 y 1.2 se recogen los rangos óptimos de propiedades físicas, físico-químicas y químicas de los sustratos para cultivo en contenedor.

Tabla 1.1. Intervalos óptimos de las propiedades físicas de los sustratos de cultivo (Carmona y Abad, 2008).

Propiedad	Unidad	Intervalo óptimo
Tamaño de partícula	mm	0.25-2.5
Densidad aparente	kg/m ³	<0.4
Densidad de partícula	kg/m ³	1450-2650
Porosidad	% (v:v)	>85
Retención de agua a potencial:		
-1 kPa	% (v:v)	55-70
-5 kPa	% (v:v)	31-40
-10 kPa	% (v:v)	25-31
Volumen de aire	% (v:v)	20-30
Agua fácilmente disponible	% (v:v)	20-30
Agua de reserva	% (v:v)	4-10
Agua total disponible	% (v:v)	24-40
Contracción	% (v:v)	<30

Tabla 1.2. Intervalos óptimos de las características físico-químicas y químicas de los sustratos de cultivo (Carmona y Abad, 2008).

Propiedad	Unidad	Intervalo óptimo
pH (pasta saturada)		5.2-6.3
CE (extracto de saturación)	mS/m	75-349
Capacidad de intercambio catiónico	me/100g	>20
Cenizas	%	<20
Materia orgánica	%	>80
Relación C/N		20-40
Nutrientes asimilables (extracto de saturación):		
Nitrógeno nítrico	mg/L de extracto	100-199
Nitrógeno amoniacal	mg/L de extracto	0-20
Fósforo	mg/L de extracto	6-10
Potasio	mg/L de extracto	150-249
Calcio	mg/L de extracto	>200
Magnesio	mg/L de extracto	>70

1.1.1. TIPOS DE SUSTRATOS

Un material utilizado como sustrato puede utilizarse en estado puro o en mezcla con otros materiales, conformando lo que se denomina componente de sustrato. Las materias primas para sustrato pueden ser inorgánicas u orgánicas. Los inorgánicos son materiales minerales no biodegradables, sean de origen natural, tratados o procedentes de residuos industriales. Los materiales orgánicos, por su parte, pueden ser de origen natural (turbas) o de residuos de actividades agrícolas, urbanas o industriales (restos de poda, RSU, gallinaza...), y, a diferencia de los inorgánicos, suelen necesitar un proceso de estabilización para reducir la actividad microbiana y la fitotoxicidad (Burés, 1997). El tratamiento más común que se lleva a cabo es el compostaje y, en menor escala, el vermicompostaje. Recientemente se está implantando la carbonización, aunque los materiales que se obtienen no se suelen derivar a la producción de sustratos sino a la utilización energética.

1.1.2. PROBLEMÁTICA DE LA TURBA

Como puede resultar lógico, no existe un sustrato ideal para la producción de plantas, puesto que las necesidades varían según muchas condiciones (especie, clima, aspectos económicos, tipo de envase, programas de riego y fertilización, etc.), pero entre los sustratos más utilizados tradicionalmente para cultivo en contenedor se encuentra la turba, gracias a su alta estabilidad física y química y su baja ratio de degradación. Actualmente, sólo alrededor del 20% de los medios de cultivo utilizados en la UE comprenden materiales que no son turba (Gruda, 2012).

Las turbas son fundamentalmente vegetales fosilizados, constituidos por restos de musgos y de otras plantas superiores descompuestos de modo incompleto a causa del exceso de agua y de la falta de oxígeno, de modo que conservan parcialmente su estructura anatómica durante largos periodos de tiempo (Strasburguer et al., 1986; Vasander, 1996). La turba se extrae de las turberas, que son ecosistemas considerados por el Consejo Europeo como hábitats naturales de gran fragilidad y que requieren conservación. Por el papel que cumplen las turberas como sumideros de carbono, el carácter difícilmente renovable y el alto coste que requiere la importación de turba, el impulso de agriculturas más «ecológicas» y la legislación restrictiva han dado lugar a la creciente búsqueda de materiales alternativos para sustituirla, especialmente los procedentes de residuos y subproductos orgánicos, más «ecológicos» y con precios más bajos

(Abad et al., 1997). Estos materiales incluyen, por ejemplo, composts, cortezas, madera, fibra de coco y otros productos orgánicos, tales como los resultantes de la pirólisis y la carbonización hidrotermal de materias y residuos vegetales (Gruda, 2012).

1.1.3. COMPOSTS

El compostaje se puede definir como el proceso de degradación aerobia de residuos orgánicos que se produce de forma natural por los microorganismos presentes en el propio residuo cuando está expuesto al oxígeno. El proceso consta de dos fases, una termófila y otra de maduración, y el producto, además de higienizado y estable, ofrece una granulometría que permite postularlo como potencial componente de sustratos (Carmona y Abad, 2008). Un compost maduro es, pues, un material húmico estable creado a partir de la combinación de residuos orgánicos (restos de poda, desechos alimenticios, estiércol...) que se depositan en proporciones adecuadas en pilas, filas o recipientes, donde se controla la temperatura, la humedad y el oxígeno para conseguir una descomposición acelerada (Christian et al., 2009).

La utilización de productos orgánicos como el compost para la elaboración de sustratos permite tanto el aprovechamiento (valorización) de residuos orgánicos, como la generación del mínimo impacto ambiental, manteniendo un uso sostenible de los recursos naturales y una reducción de los costes económicos que supone la turba. Además, el compost posee reguladores del crecimiento de las plantas y propiedades que suprimen patógenos del suelo (Lumsden et al., 1986). Son muchos los trabajos que contemplan el uso del compost como sustrato, a partir del aprovechamiento de numerosos residuos como los hortícolas, restos de poda en combinación con biosólidos, lodos residuales, residuos vitivinícolas, purines o gallinaza. Algunos de estos materiales como los purines o la gallinaza son muy rica en nitrógeno y se requiere co-compostarlos con otros materiales estructurantes para mantener una relación C/N óptima (Fornes y Belda, 2014).

El compost como sustrato debe presentar alto grado de madurez y propiedades físicas y químicas adecuadas: tamaño de partícula, porosidad, capacidad de retención de agua, conductividad eléctrica, pH. Éstas son incluso más relevantes que la concentración de nutrientes, puesto que éstos pueden ser añadidos una vez establecido el cultivo por fertilización (Gouin, 1998). Los composts suelen presentar altos valores de porosidad y baja capacidad de retención de agua (Abad et al., 2001), alto contenido en nutrientes como N-P-K y alta salinidad (López-Real et al., 1989). La conductividad eléctrica es un factor importante si se usa como sustrato para plantas hortícolas y brotes de semilla (Sanchez-Monedero et al., 1997; Eklind et al., 1998).

Sin embargo, el compost suele requerir de mezcla con otros materiales, generalmente pobres en nutrientes, sea después del compostaje o durante el proceso. Esto es necesario para mejorar las propiedades físico-químicas del compost para el cultivo en contenedor, aunque también se puede usar el lixiviado como un proceso para reducir la proporción de materia orgánica biodegradable presente. El resultado de mezclar composts de orígenes muy diversos con otros materiales, como son turba, lodos residuales, etc., ha presentado buenos resultados según García-Gómez y colaboradores (2002).

Por tanto, el compost es un material muy práctico y de buen uso, pero requiere un proceso muy delicado y, en la mayoría de veces, la introducción de otros materiales.

1.1.4. BIOCHAR

En la actualidad, la necesidad de desarrollo de energías renovables y reducción de emisiones de CO₂ para la lucha contra el cambio climático ha impulsado el aprovechamiento de la biomasa, fuente caracterizada por su abundancia, su poder energético y su versatilidad (*Graber et al., 2010*), especialmente la biomasa residual procedente de la industria maderera, mantenimiento de bosques y zonas verdes, industria agrícola y agroalimentaria, etc.

En este contexto, los biocombustibles han sido considerados una posibilidad, pero sufren de limitaciones por competir por el suelo dedicado a la producción de alimentos y por producir emisiones de gases de efecto invernadero por cambio indirecto del uso del suelo (*Kauffman et al., 2014*).

Por todo lo dicho, se ha desarrollado un creciente interés por el biochar. El biochar, o biocarbono, es un producto de grano fino y poroso similar en sus propiedades al carbono vegetal. Se obtiene a partir de cualquier tipo de residuo orgánico por un proceso de carbonización a baja presión de oxígeno que puede tener lugar por vía seca (pirólisis) o por vía húmeda (carbonización hidrotermal, HTC) (*Libra et al., 2011*). El biochar presenta características similares a composts y vermicomposts aunque es más estable. De hecho, se dice que es recalcitrante por este mismo motivo (*Lehmann y Joseph, 2010*).

La producción a gran escala de biochar a partir de biomasa residual (agrícola y forestal) y su aplicación al suelo pueden suponer una forma de reducir la cantidad de CO₂ atmosférico y mitigar los efectos del cambio climático, debido a que el biochar tiene potencial como sumidero de carbono (*Fornes et al., 2015*). Además, algunos estudios han demostrado su efecto beneficioso sobre las características del suelo y el crecimiento vegetal (*Albuquerque et al., 2013*).

El biochar está compuesto por una gran cantidad de carbono altamente estable, y secuestra carbono si es usado como enmienda (*Brewer et al., 2009*). Esto depende de su calidad, medida como la cantidad de carbono lábil respecto al recalcitrante, que influye en su potencial de secuestro de carbono (*Bruun et al., 2011*). El carbono lábil puede estimular la mineralización de la materia orgánica del suelo, pero a largo plazo el biochar aumenta la estabilización de los componentes orgánicos biogénicos a través de adsorción y humificación (*Rogovska, 2011; Zimmerman, 2011*). Por otra parte, usado como enmienda, reduce la necesidad de fertilizantes sintéticos de nitrógeno en los cultivos porque el biochar disminuye las pérdidas de nitrógeno debidas a la lixiviación y porque puede reducir emisiones de N₂O. La aplicación de biochar reduce la densidad aparente del suelo e incrementa por tanto la porosidad y aireación. Así pues, las enmiendas con biochar tienen el potencial de mejorar la retención de nutrientes y el agua del suelo. Esto resulta en una reducción del lixiviado de nutrientes y de un aumento en la retención de agua disponible para la planta. Estas dos características podrían incrementar la producción neta o mejorar el uso eficiente de nutrientes y agua de los cultivos (*Kauffman et al., 2014*).

Las ventajas del biochar, por tanto pueden ser resumidas en: secuestro de carbono, reducción potencial de emisiones de óxido nitroso (N₂O) y efecto en los niveles de carbono orgánico del suelo y sobre los cultivos.

El biochar es además utilizado como agente estructurante en el compostaje de materiales de origen animal, como son la gallinaza y los purines. Un agente estructurante tiene la función de proveer propiedades físicas, químicas y biológicas que permiten el correcto compostaje: soporte estructural para prevenir la compactación de la pila de compostaje y aumentar la aireación (*Haug, 1993*), aporte de C que mejora la relación C/N de la mezcla, reduciendo las pérdidas de N (*Adhikari et al., 2009*). En definitiva, es importante para la estabilización de la materia orgánica, reduciendo su degradación y aumentando la humificación y la calidad de los composts finales (*Mahimairaja et al. 1994; Goyal et al., 2005*).

La gallinaza es un fertilizante potencial por ser rica en N, P, K y micronutrientes. No obstante, el compostaje de ésta, que reduce la presencia de patógenos, semillas de malas hierbas y olores, suele resultar en altas pérdidas de N por volatilización en forma de NH_3 . El biochar ha demostrado que como agente estructurante para el compostaje, actúa como un absorbente de NH_3 y NH_4 soluble, pudiendo reducir las pérdidas de N durante el compostaje, y permite optimizar el proceso reduciendo el hedor y produciendo un compost maduro con una composición equilibrada de nutrientes (*Dias et al., 2010; Steiner et al., 2010*). Un estudio dirigido por Steiner (2010) indica una mayor descomposición de la gallinaza si se enmienda con biochar. Las concentraciones en amoníaco de las emisiones se reducen hasta un 64% y las pérdidas en N hasta un 52%. Por eso el biochar puede ser un agente estructurante ideal para el compostaje de materiales ricos en nitrógeno como la gallinaza.

En conclusión, el biochar resulta ser un material accesible y muy interesante a estudiar por los múltiples beneficios que puede aportar, tanto al cultivo de plantas, al tratamiento de residuos orgánicos como al medioambiente. Sin embargo, son pocos los estudios de este material como sustrato o componente de sustrato para cultivo de planta en contenedor (*Fornes et al., 2014, Fornes y Belda, 2015*), siendo éste uno de los objetivos de este trabajo fin de grado.

2. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es analizar la utilización de compost de gallinaza, compost de gallinaza co-compostada con biochar procedente de la poda de encina y de biochar en la formulación de sustratos para cultivo de planta en contenedor.

Los objetivos parciales son: determinar las propiedades físicas, físico-químicas, químicas y biológicas de los materiales puros y de sus mezclas con turba o con biochar y realizar un ensayo agronómico de los materiales cultivando romero.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES A ESTUDIAR

3.1.1. MATERIALES PUROS

Los posibles componentes de sustrato estudiados para el cultivo en contenedor de *Rosmarinus officinalis* constaron de cuatro materiales: un material orgánico carbonizado, dos sustratos a base de compost y turba: 1) Compost de gallinaza, 2) Turba rubia *Sphagnum* (sin encalar ni fertilizar), 3) Compost de gallinaza co-compostada con biochar y 4) biochar, producto de la pirólisis de restos de encina (*Quercus ilex* L.). Además se utilizaron los sustratos comerciales para enraizamiento y para crecimiento de planta del propio vivero donde se realizaron los ensayos agronómicos.

3.1.2. MEZCLAS

Las mezclas de los 4 materiales puros de partida siguieron tres líneas: compost de gallinaza mezclado con biochar, compost de gallinaza mezclado con turba y compost de gallinaza co-compostada con biochar (gallinaza-biochar, GB) mezclado con turba.

La composición en porcentaje de volumen de las mezclas realizadas se expresa en la tabla siguiente:

Tabla 3.1. Composición en porcentaje de volumen (% v:v) de las mezclas realizadas.

Gallinaza : Turba 75 : 25	Gallinaza : Turba 50 : 50	Gallinaza : Turba 25 : 75
Gallinaza-Biochar : Turba 75 : 25	Gallinaza-Biochar : Turba 50 : 50	Gallinaza-Biochar : Turba 25 : 75
Gallinaza:Biochar 75 : 25	Gallinaza : Biochar 50 : 50	Gallinaza : Biochar 25 : 75

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

En este apartado se describen los protocolos seguidos para la caracterización de las propiedades físicas, físico-químicas, químicas y biológicas de los materiales objeto de estudio.

3.2.1. PROPIEDADES FÍSICAS

— Granulometría

El análisis granulométrico se realizó de acuerdo a la metodología descrita en la Norma UNE-EN 15428 2008, mediante una tamizadora electromagnética digital CISA, modelo 002. Los tamices utilizados fueron de 20 cm de diámetro, de malla cuadrada, de luz 16, 8, 4, 2, 1, 0.5, 0.25 y 0.125 mm.

La muestra procesada ha de estar seca, por lo que se requirió del secado al aire durante una semana. Se pesaron 150 g de muestra, con una precisión de 0.01 g, que posteriormente se tamizaron a una intensidad de tamizadora de 8 sobre 10, durante 10 minutos.

El porcentaje en masa de cada fracción granulométrica se calculó a partir del peso retenido en cada tamiz, de la siguiente manera:

$$P_i(\%) = \frac{M_i}{M_t} \cdot 100 \quad (3.1)$$

siendo P_i el porcentaje de la fracción granulométrica y M_i la masa retenida por el tamiz de dicha fracción granulométrica. Los valores obtenidos se han expresado sin decimales.

Para cada material se realizaban dos repeticiones (una tercera si los valores resultaban muy dispares), y se obtuvo la distribución del tamaño de partícula y el valor del índice de granulometría.

— Densidad aparente (D_A)

La densidad aparente responde a la relación entre la masa del material sólido seco y el volumen total ocupado por el material húmedo (considerando también el volumen poroso entre partículas), en unas condiciones de humedad normalizadas y expresada en kg/m^3 .

La determinación de la densidad aparente se realizó conforme al procedimiento indicado en la Norma UNE-EN 13041 2012 (*De Boodt et al., 1974; Martínez, 1992*). Se partió del material seco contenido en un cilindro de volumen conocido, saturándolo con agua destilada y sometiéndolo posteriormente a una succión de -1 kPa, correspondiente a 10 cm de columna de agua.

El material utilizado para ello abarcó, para cada muestra, un par de anillas identificadas de acero inoxidable, una porción de tela de nylon y una banda de goma. Las anillas eran de dimensiones y volumen conocido, rondando 3 y 4 cm de altura y 82 mm de diámetro.

Primero se determinó el peso que conformaba la anilla grande de 4 cm de altura, la tela y la goma. Acto seguido se unió el par de anillas con banda adhesiva formando un único cilindro grande. En el extremo de la anilla grande, se colocó la tela cubriendo toda la circunferencia y adhiriéndose con la banda de goma al cilindro. En el recipiente cilíndrico formado, se añadió el material previamente humedecido hasta el límite del borde superior, ocupando todo el volumen en la medida de lo posible pero sin compactar el material.

El recipiente lleno se sumergió en baño de agua destilada, a una altura suficiente para que la superficie del material recibiese agua, aproximadamente a 0.5 cm del borde superior, dejando que el material se saturase por capilaridad durante las siguientes 48 horas.

Transcurrido el tiempo, se colocó el cilindro con material saturado en un baño de arena durante otras 48 horas, para someter la muestra a tensión de -1 kPa. El baño de arena es un recipiente de 25 L, con un drenaje a 15 cm de su base y lleno de arena de mar lavada de grano fino (0.25-0.30 mm, Panreac Química S.A) hasta la altura de 10 cm por encima del drenaje, al que se añade agua en cantidad suficiente para mantener la arena húmeda sin drenar gracias a la capilaridad.

Una vez alcanzada la tensión de -1 kPa, se retiró el cilindro del baño de arena y se separó la anilla de 3 cm del cilindro, enrasándose el material al nivel de la anilla de 4 cm con una espátula, evitando compactar el material. Este conjunto se volvió a pesar, aportando el peso del material húmedo saturado, y posteriormente se colocó en estufa a 105 °C para conseguir el secado completo del material.

La humedad se calcula como porcentaje en peso mediante:

$$X (\%) = \frac{B - C}{B - A} \cdot 100 \quad (3.2)$$

siendo X la humedad, A el peso del conjunto formado por cilindro grande + tela + goma (g), B el de dicho conjunto con la muestra húmeda (g) y C el peso del conjunto con la muestra seca (g).

Para cada material, se realizaron tres repeticiones y se calculó el valor medio de humedad, lo que permite calcular la densidad aparente, que responde a la expresión:

$$D_A \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{B - A}{V} \cdot \frac{100 - X}{100} \cdot 1000 \quad (3.3)$$

siendo D_A la densidad aparente del material y V el volumen conocido de la anilla de 4cm de altura (cm³)

El proceso se puede resumir en el siguiente esquema:

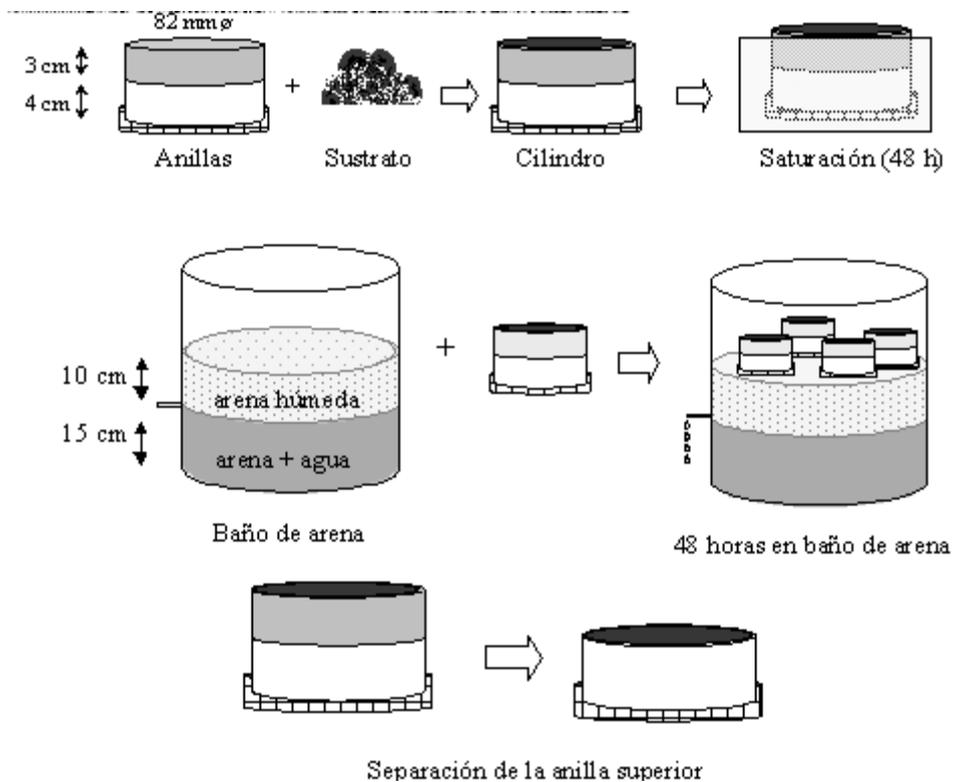


Figura 3.1. Esquema del procedimiento seguido en la determinación de la densidad aparente (D_A) (Noguera, 1999).

— **Espacio poroso total (EPT)**

El espacio poroso total o porosidad total se determina, de acuerdo a la Norma UNE-EN 13041 2012, mediante la siguiente ecuación:

$$EPT (\%v/v) = \left(1 - \frac{D_A}{D_R}\right) \cdot 100 \quad (3.4)$$

— **Volumen de agua (V_{ag})**

Se calcula mediante la siguiente ecuación recogida en la Norma UNE-EN 13041 2012:

$$V_{ag} (\%v/v) = \frac{B - C}{V} \cdot 100 \quad (3.5)$$

siendo B, C y V parámetros explicados líneas arriba en la fórmula (3.2).

— **Volumen de aire (V_{ai})**

Se determina en base a la ecuación recogida en la Norma UNE-EN 13041 2012:

$$V_{ai} (\%v/v) = EPT - V_{ag} \quad (3.6)$$

— **Capacidad de retención de agua (CRA)**

Para la determinación de la CRA se procede según lo especificado en la Norma UNE-EN 13041 2012, y mediante la modificación de la metodología de *De Boodt et al. (1974)* propuesta por *Martínez (1992)*, con el uso de la expresión:

$$CRA \left(\frac{g \text{ agua}}{100 g \text{ material seco}} \right) = \frac{B - C}{C - A} \cdot 100 \quad (3.7)$$

cuyas variables se han calculado en la determinación de la densidad aparente.

— **Contracción de volumen (Ctr)**

La contracción corresponde a la pérdida de volumen aparente experimentada por el material húmedo contenido en la anilla de 4cm de altura tras secarse, a 105°C en estufa. Su cálculo se basa en la Norma UNE-EN 13041 2012 y la metodología propuesta por *Martínez (1992)*, mediante la ecuación:

$$Ctr (\%v/v) = \left(\frac{V - V_s}{V} \right) \cdot 100 \quad (3.8)$$

siendo V el volumen de la anilla de 4cm y V_s el volumen del material seco. V_s es calculado con la expresión del volumen de un cilindro ($h\pi r^2$) tras determinar las medidas de altura y diámetro del material seco contenido en la anilla.

3.2.2. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS Y QUÍMICAS

Para la determinación de características físico-químicas y químicas de los materiales a estudiar se realizó el extracto acuoso 1:5 (v:v) del material, según lo indicado en la Norma UNE-EN 13040 2008.

Para ello, es necesario determinar la densidad aparente compactada en laboratorio del material. De este modo, se utilizó un cilindro de volumen conocido en el que se realizó la

compactación del material según indica la norma, pesando el sustrato antes y después de la compactación.

Determinado este parámetro se puede calcular el peso equivalente a 60 mL de cada material, el cual se introdujo en un recipiente de plástico al que se añadieron 300 mL de agua destilada. El recipiente sellado se sometió a agitación durante una hora y posteriormente se filtró la suspensión obtenida a recipientes más pequeños. Para cada material se realizaron tres repeticiones, y con el extracto realizado se puede proceder a la determinación de los parámetros de pH y conductividad eléctrica.

— pH

La determinación del pH se realizó según lo estipulado en la Norma UNE-EN 13037 2012, inmediatamente después de la agitación de la suspensión acuosa 1:5 (v:v) del material y antes de proceder al filtrado de ésta. Se utilizó para ello un pH-metro CRISON modelo 2000 con electrodo CRISON modelo 5000-20.

— Conductividad eléctrica (CE)

Las medidas de conductividad eléctrica se realizaron sobre el extracto obtenido tras filtración de la suspensión acuosa 1:5 (v:v), según lo indicado en la Norma UNE-EN 13038 2012. Se utilizó un conductímetro CRISON modelo 522 equipado con una célula de conductividad CRISON modelo 52-89. Los resultados obtenidos a temperatura ambiente fueron corregidos para expresar los valores en mS/m a 25°C.

— Materia orgánica y materia mineral (MO y MM)

El material orgánico responde a la pérdida de masa tras calcinación, mientras que la materia mineral corresponde a la masa restante o cenizas, y el conjunto de ambas suman siempre el 100% de la masa seca inicial. La determinación del contenido en materia orgánica y mineral se realizó según la metodología recogida en la Norma UNE-EN 13039 2012.

El material utilizado en este apartado es material seco, por lo que fue sometido a estufa previamente, durante un periodo aproximado de 24 horas. Se utilizaron crisoles pequeños que se pesaron en balanza con precisión de cuatro decimales, y a los que posteriormente se les añadieron aproximadamente 5 g de muestra seca que se pesaron con la misma precisión. Se realizaron 3 repeticiones por material.

Los crisoles se colocaron en manta calefactora hasta que se disipó el humo blanco inicial, entre 5 y 15 minutos, para después cubrirse con tapas de porcelana y ser introducidos en horno mufla. El material se calcinó a 450 ± 25 °C, durante 6 horas. Posteriormente se dejó enfriar y se pesó.

Los valores de MO y MM se calculan según las ecuaciones siguientes:

$$MO (\%) = \frac{B - C}{B - A} \cdot 100 \quad (3.9)$$

$$MM (\%) = \frac{C - A}{B - A} \cdot 100 \quad (3.10)$$

donde A es el peso del crisol, B es el peso del crisol con la muestra seca y C es el peso del crisol con las cenizas. Los valores de MO y MM suman 100%, por lo que una vez calculado uno, el otro se puede obtener por diferencia.

3.2.3. PROPIEDADES BIOLÓGICAS

En cuanto a propiedades biológicas, se realizaron bioensayos de germinación y se determinó la respiración (respirometría) de la biomasa microbiana. Por la extensión del presente trabajo, no se pudo llevar a cabo el estudio de la inmovilización de nitrógeno ni otras determinaciones de interés.

— Bioensayos de germinación

Los bioensayos de germinación son unos experimentos sencillos que permiten obtener resultados en un corto lapso de tiempo. Aunque no recogido por una norma oficial, una metodología muy seguida es la de Zucconi y colaboradores (1981a, 1981b), que se basa en que la salinidad elevada o la presencia de sustancias tóxicas (ácidos alifáticos de cadena corta, compuestos fenólicos...) pueden inhibir o retrasar la germinación y provocar una reducción en el crecimiento de las radículas.

Los bioensayos de germinación determinan la germinación de las semillas y el crecimiento de las radículas emergidas en comparación con un control de agua destilada (Zucconi et al., 1981a, 1981b). Consisten en la colocación de semillas de una o varias especies vegetales en contacto con el extracto acuoso del material a testar, controlándose la tasa de germinación y el alargamiento de las radículas.

Los bioensayos se realizaron con el extracto acuoso 1:5 (v:v) de los materiales estudiados puros y diluidos al 75% con agua destilada, con el agua destilada como control. Se utilizaron semillas de dos especies, berro (*Lepidium sativum* L., cv. 'Alenois') y lechuga (*Lactuca sativa* L., cv. 'Bionda Degli Ortolani'). La primera es una especie sensible a la toxicidad del sustrato (Buss and Masek, 2014; Zucconi et al., 1981) mientras que la segunda es especialmente sensible a la salinidad (Choi et al., 1989).

El procedimiento requirió placas Petri y papel de filtro circular que se colocaba dentro de las placas. El papel se humedeció con unas gotas de extracto y posteriormente se depositaron 10 semillas de la especie a tratar, con pinzas. Se cubrieron las semillas con otro papel de filtro, que se humedeció de igual forma al anterior, y la placa Petri cerrada pasó a reposar dentro de cámara termostataada. Para cada material, se realizaron 5 repeticiones en este ensayo.

La germinación se llevó a cabo en oscuridad, 3 días a 23 °C en el berro, y 5 días a 17 °C en el caso de la lechuga. Cumplido el tiempo, se procedió al control del porcentaje de germinación de semilla y la medición de la longitud de la radícula de las semillas germinadas.

El índice de germinación se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$IGe (\%) = \frac{\%G_{extracto}}{\%G_{control}} \cdot \frac{Lr_{extracto}}{Lr_{control}} \cdot 100 \quad (3.11)$$

siendo %G el porcentaje de germinación y Lr la longitud de la radícula.

— Respirometría

El término respiración en edafología se utiliza para describir el intercambio de O₂ y CO₂ que se produce entre un material y el ambiente. La respiración del suelo o un sustrato sin plantas es un proceso derivado de la actividad biológica que desarrolla la fauna que vive en ella, descomponiendo los compuestos orgánicos presentes. Un método para determinar la velocidad de descomposición de la materia orgánica consiste en medir el consumo de O₂ y la producción de CO₂ que resulta del metabolismo de estos organismos (Hernández y García, 2003), ya que en

presencia de O₂ se produce la descomposición por microorganismos aerobios, con un cociente respiratorio igual a la unidad.

En la respiración también influyen las características del material, como son la porosidad, el tamaño de los poros, la continuidad de éstos y otros que pueden afectar al flujo gaseoso y, por tanto, a la tasa respiratoria (Luo y Zhou, 2006). Estas propiedades del suelo determinan la capacidad de transporte de las moléculas, aunque en el ensayo tenga menor repercusión por ser muestras con cantidades pequeñas de sustrato y colocadas en matraces.

El CO₂ producido por la actividad metabólica de los microorganismos y el O₂ consumido se determinaron midiendo periódicamente la concentración de CO₂ mediante la absorción de infrarrojos y la concentración de O₂ mediante sensor electroquímico.

Para este apartado se trabajó sólo con los materiales puros, las mezclas al 50%, y el sustrato comercial de enraizamiento, realizándose tres repeticiones por cada uno de ellos. Las muestras debían estar al 70% de su capacidad de retención de agua, por lo que se realizó un ensayo previo con columnas de percolación, colocando cada material en un tubo y haciendo pasar agua hasta su saturación. Posteriormente se dejó drenar durante un día y se determinó la humedad retenida por gravimetría (Hart et al., 1994; Zibilske, 1994).

Se pesaron 10 g de muestra al 70% de su capacidad de retención, que se añadieron a matraces Erlenmeyer de 250 mL que se taparon herméticamente con tapones tipo Septum, y se colocaron en cámara de incubación a una temperatura constante de 25 °C. Además, se prepararon dos blancos que sirvieron de control; estos matraces sólo contenían aire en su interior. Se analizó así la evolución de un total de 24 muestras y 2 blancos, durante un período de 118 días a condiciones de temperatura y humedad constantes.

Los matraces preparados no eran destructivos, por lo que las mediciones de contenido de O₂ y CO₂ se realizaron siempre en los mismos matraces. Puesto que las fechas para medir son flexibles, atendiendo a la capacidad de respiración de cada material, las lecturas se realizaron periódicamente, con mayor frecuencia al inicio y menor cuando se percibía una relativa estabilidad en las muestras. La medición se efectuaba con un equipo analizador de gases portátil (Dansensor, CheckPoint), y se anotaban los porcentajes en volumen de ambos gases.

Para evitar las condiciones de anaerobiosis en las muestras incubadas, que provocarían la ralentización de la descomposición de los sustratos, los matraces se sometían a una aireación si se observaba un porcentaje de oxígeno insuficiente para mantener la incubación hasta la siguiente lectura. La aireación se realizaba gracias a una pequeña bomba generadora de aire, y permitía alcanzar de nuevo los niveles de O₂ y CO₂ del aire (alrededor de 21% y 0%, respectivamente)

El cálculo posterior de consumo de O₂ y producción de CO₂ se realizó en base a la ecuación de los gases ideales, calculando la masa de gas consumido o producido:

$$m = \frac{PVM}{RT} \quad (3.12)$$

donde m es la masa a calcular, P la presión atmosférica, V el volumen de gas en el matraz, M la masa molar del gas, R la constante universal de los gases ideales y T la temperatura de incubación.

3.3. EVALUACIÓN AGRONÓMICA

La evaluación agronómica de los sustratos se realizó mediante dos experimentos (uno de enraizamiento y otro de crecimiento) con *Rosmarinus officinalis*, en el vivero Tenisplant (Picassent, Valencia).

3.3.1. ENRAIZAMIENTO

El ensayo se diseñó con los 13 sustratos y el sustrato del vivero como referencia, disponiendo 3 repeticiones con 24 estacas cada una por cada material. El experimento se realizó sobre bandejas negras de 120 alveolos de 20 mL de capacidad en las que se dispusieron el material y estacas homogéneas de *Rosmarinus officinalis*, con riego por nebulización y sin recibir fertilización.

El experimento duró 2 meses. Tras levantar el ensayo, se obtuvieron los siguientes parámetros: porcentaje de enraizamiento, longitud y peso seco tanto del tallo como de la raíz. La longitud fue medida con regla milimetrada. El peso seco se obtuvo tras separar convenientemente tallo y raíz e introducirlo en estufa a 70 °C, realizándose la medición con balanza con precisión de 0.001 g.

3.3.2. CRECIMIENTO

Se montó el ensayo con macetas de 0.5 L de capacidad, utilizándose 12 macetas por sustrato, 4 repeticiones con 3 macetas cada repetición. Se trasplantaron en ellas plántulas de romero ya enraizadas, de unos 10 cm de altura, y recibieron fertirrigación por nebulización dos veces por semana con proporción 8-1-10-1 (N-P₂O₅-K₂O-MgO) en dilución de 1.5 Lm⁻³ en agua.

Se dio por finalizado el ensayo 5 meses después, tras lo cual se midieron los parámetros de crecimiento: altura del vástago, número de ramas, nivel de enraizamiento, peso fresco del vástago, y cuantificación de clorofila a y b.

La altura de la planta se midió con regla milimetrada. El número de ramas se determinó por conteo. El nivel de enraizamiento se obtuvo por valoración visual en una escala numérica de 1 a 4. El valor 1 se asignó al crecimiento radical más pobre (escasa colonización del sustrato, raíces finas o delgadas, poco turgentes) y el 4 a un desarrollo excelente de las raíces (sustrato profusamente colonizado por raíces, raíces gruesas y carnosas, turgentes, y de color blanco brillante), mientras que las puntuaciones 2 y 3 se fijaron para valores intermedios. El peso se midió con balanza de precisión 0.01 g. El contenido en clorofila se determinó según Moran y Porath (1980) y Moran (1982). Además, muestras secas de hoja correspondientes a todos los tratamientos se enviaron para su análisis al servicio de Ionómica del Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS; CSIC)

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

Para el estudio estadístico, los resultados fueron analizados mediante el programa Statgraphics® Centurion XVI.II para Windows (Statistical Graphics Corp., 2005). Se utilizaron técnicas de Análisis de la Varianza (ANOVA simple y factorial) para analizar los resultados obtenidos experimentalmente. La significación de los parámetros se halló aplicando la prueba de Student-Newman-Keuls, siendo $P \leq 0.05$ el nivel de significación mínima.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN DE SUSTRATOS. PROPIEDADES FÍSICAS, FÍSICO-QUÍMICAS Y QUÍMICAS.

La caracterización de los materiales es de gran importancia para conocer sus propiedades físicas, físico-químicas, químicas y biológicas, pues éstos son factores limitantes que determinarán su uso potencial como sustrato o componente de un sustrato en horticultura (*Abad et al., 2005*). Los materiales orgánicos, por sí solos, no suelen reunir las características idóneas para un determinado cultivo. En general se utilizan como componentes de sustrato mezclándose con otros materiales para adecuar el sustrato a un cultivo concreto.

En la práctica, para valorar la calidad de un sustrato no basta con conocer las propiedades generales de sus principales componentes, sino que es necesario determinarlas para cada mezcla particular, ya que las variaciones suelen ser muy importantes (*Ansorena, 1994*). Por ejemplo, el volumen de la mezcla sufre reducción respecto al de los materiales puros porque las partículas menores del material de granulometría más fina tienden a ocupar los poros del material de granulometría más gruesa.

Las propiedades físicas en un sustrato son de especial relevancia puesto que no se pueden modificar una vez implantado un cultivo, mientras que las químicas tienen la posibilidad de ser modificadas durante el cultivo mediante técnicas adecuadas (*Abad et al., 2005*).

4.1.1. GRANULOMETRÍA

Se trata del primer paso en la caracterización de todo material. El mejor sustrato se define como aquel material de textura media a gruesa, equivalente a una distribución del tamaño de las partículas entre 0.25 mm y 2.5 mm, que retiene suficiente agua fácilmente disponible y presenta, además, un adecuado contenido en aire (*Raviv et al., 1986; Puustjarvi, 1994*).

Tras la determinación de la distribución granulométrica de todos los materiales estudiados, expresada como porcentaje en peso de cada fracción, los resultados se han presentado en forma de columnas apiladas, planteadas a modo de gradación continua en la composición del material. El porcentaje acumulado en fracciones mayor a 1 mm indica el valor de índice de grosor (IG) del sustrato.

La figura 4.1 refleja los resultados granulométricos de los 15 sustratos ensayados. Se ha añadido la distribución de los sustratos comerciales utilizados en el vivero, como una mera referencia para comparación.

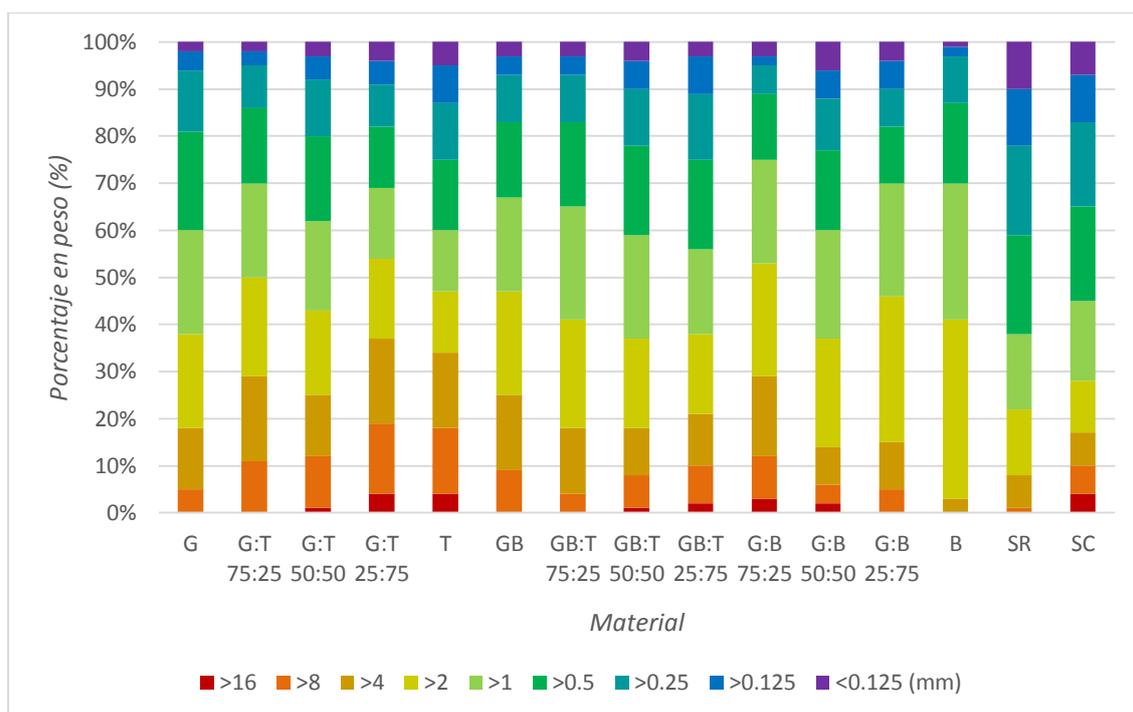


Figura 4.1. Distribución granulométrica del compost de gallinaza (G), el compost de gallinaza co-compostada con biochar (GB), la turba (T), el biochar (B), el sustrato comercial de enraizamiento (SR), el sustrato comercial de crecimiento (SC) y sus mezclas. La relación de mezcla se indica en (%v:v).

Según la figura, todos los materiales de estudio presentan un índice de granulometría (partículas mayores a 1 mm) superior a 50%, excepto los sustratos comerciales, que se mantienen por debajo. La abundancia de partículas menores de 0.25 mm nos indicaría un material que retiene más agua de la deseada, mientras que si abundan partículas mayores a 2 mm nos encontraríamos con un material con buena aireación pero con baja retención de agua.

Se puede observar que una gradación en la proporción de los elementos que constituyen las mezclas no tiene por qué corresponderse exactamente con una gradación en la distribución del tamaño de partículas. Esto es así por diversas razones: el proceso físico de mezclado puede deshacer agregados presentes en alguno de los componentes, en mayor o menor medida según el poder abrasivo del otro componente y el tiempo y energía empleados en realizar la mezcla; uno de los componentes puede actuar como aglomerante para las partículas del otro componente.

Se observa en el compost gallinaza que más del 60% de sus partículas entran en el rango óptimo de granulometría. En cambio en la turba se observa una distribución más homogénea de sus partículas, donde sólo cumple la idoneidad un 50%, conteniendo más porcentaje de partículas de la fracción menor (<0.125 mm) y de la fracción mayor (>16 mm). Conforme aumenta la proporción de turba en las mezclas con compost de gallinaza, la fracción mayor y la menor aumentan. El compost de gallinaza parece presentar a simple vista mejor distribución que la turba (mayor proporción entre 0.25 y 2.5 mm), mientras que en el compost de gallinaza co-compostada con biochar las diferencias no son tan claras. El biochar presenta en su mayoría partículas menores a 4 mm, siendo el material con una distribución de partículas más compacta en el rango óptimo de 0.25 a 2 mm.

Aunque conocer la distribución granulométrica sea esencial y básico para comprender el comportamiento de un material, no es suficiente para predecir con precisión el conjunto de propiedades físicas, ni mucho menos las químicas, que posee cada sustrato. Por tanto, la

granulometría permite dar un primer paso que debe ser convenientemente completado con el análisis del resto de propiedades físicas, físico-químicas y químicas.

4.1.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, FÍSICO-QUÍMICAS Y QUÍMICAS

Para cumplir correctamente con las funciones de regulación del suministro de agua, aire y nutrientes, los sustratos deben poseer unas adecuadas propiedades físicas y químicas que permitan aportar a la planta sus necesidades.

Las tablas 4.1 y 4.2 muestran los resultados del análisis de las propiedades físicas, físico-químicas y químicas más habituales que describen las normas UNE-EN. Los resultados se han analizado comparando por separado dos a dos las diferentes líneas de sustratos estudiadas:

A) Comparación de sustratos conteniendo compost de gallinaza (G) o compost de gallinaza co-compostada con biochar (GB) y su mezclas con turba (T) (Tabla 4.1)

B) Comparación de sustratos conteniendo compost de gallinaza (G) y sus mezclas con turba (T) o biochar (B) (Tabla 4.2)

Los resultados son comentados con la abreviatura elegida para cada material con el objetivo de hacer más sencilla la lectura.

Las propiedades de los sustratos comerciales, aunque no entraron en el análisis estadístico, se han añadido a modo de referencia. El valor de sus propiedades no se comenta, pero entran en el rango óptimo o están muy próximos.

A) Comparación de sustratos conteniendo compost de gallinaza o compost de gallinaza co-compostada con biochar y su mezclas con turba.

Tabla 4.1. Características físicas, fisico-químicas y químicas de los sustratos a base de compost de gallinaza (G) o gallinaza co-compostada con biochar (GB), mezclados con turba.

Mat	Dil	DA (kg/m ³)	CRA (g agua/ 100g ms)	EPT (%v/v)	Vag (% v/v)	Vai (% v/v)	Ctr (% v/v)	pH	CE (mS/m)	MO (%)	MM (%)
G	1 ¹	393b	167.3	79.3g	64.9b	14.3bc	17.9cd	9.24b	1082a	49.7e	50.3
G	2	316d	231.8	83.2e	73.0a	10.2cd	28.7a	8.65d	877c	50.2e	49.8
G	3	293e	279.6	84.1d	68.7b	13.9bc	27.1a	6.84h	694e	51.5e	48.5
G	4	187g	364.8	88.8b	72.2a	16.6b	23.2b	7.04g	364g	69.7b	30.3
G	5	113h	583.4	92.1a	67.4b	24.7a	18.6c	4.16i	6i	97.8a	2.2
GB	1	440a	162.8	77.1h	71.5a	5.6de	17.2cd	9.47a	1033b	46.1f	53.9
GB	2	350c	210.6	81.2f	74.2a	7.0d	22.9b	9.05c	774d	49.6e	50.4
GB	3	267f	274.6	85.2c	72.6a	12.6bc	15.0d	8.22e	562f	58.2d	41.8
GB	4	200g	361.7	88.4b	72.9a	15.5b	17.1cd	7.54f	317h	64.4c	35.6
GB	5	113h	583.4	92.1a	67.4b	24.7a	18.6c	4.16i	6i	97.8a	2.2
SR		105	815.0	93.1	85.5	7.6	31.3	6.33	37	89.6	10.4
SC		111	701.0	92.7	77.4	15.3	24.4	5.01	26	91.0	9.0
Efec Pr											
Mat	G	261	329.4a	85.5	69.2	15.9	23.1	7.19	605	63.8	36.2
	GB	274	318.6b	84.8	71.7	13.1	18.2	7.69	538	63.2	36.8
Dil	1	417	165.1e	78.2	68.2	9.9	17.6	9.36	1058	47.9	52.1
	2	333	221.2d	82.2	73.6	8.6	25.8	8.85	826	49.9	50.1
	3	280	277.1c	84.6	73,2	13.3	21.0	7.53	628	54.9	45.2
	4	193	373.3b	88.6	72.6	16.0	20.2	7.29	341	67.0	33.0
	5	113	583.4a	92.1	67.4	24.7	18.6	4.16	6	97.8	2.2
Sig St ²											
Mat		**	**	**	ns	ns	***	***	***	ns	
Dil		***	***	***	***	***	***	***	***	***	
Mat x Dil		***	ns	***	***	***	**	***	***	***	
Rango Óptimo		<400		>85	30-80	10-30	<30%	5.2-6.3	75-349	>80	

Mat= material; **Dil**= dilución; **Mat x Dil**= interacción del material y la dilución; **Efec Pr**= efectos principales; **Sig St**= significación estadística.

G= Compost de gallinaza; **GB**= compost de gallinaza co-compostada con biochar; **SR**= Sustrato comercial utilizado para enraizamiento; **SC**= sustrato comercial utilizado para crecimiento.

DA= densidad aparente; **CRA**= capacidad de retención de agua; **VAg**= Volumen de agua; **VAI**= Volumen de aire; **Ctr**= contracción; **EPT**= Espacio poroso total; **CE**= conductividad eléctrica a 25°C; **MO**= materia orgánica; **MM**= materia mineral.

¹Dilución de compost:turba (%v:v): 1=100:0; 2=75:250; 3=50:50; 4=25:75; 5=0:100 (control de turba).

²Significación estadística: ns, *, **, *** indican no significativo y estadísticamente significativo a P ≤ 0.05, P ≤ 0.01, P ≤ 0.001, respectivamente (prueba de Student–Newman–Keuls).

Todas las mezclas de esta línea entran el rango óptimo de **densidad aparente**, salvo el caso del GB puro. Reduciendo su proporción en un 25% en una mezcla, este parámetro se reduce lo suficiente para cumplir plenamente con el rango óptimo. En mayor profundidad, podemos decir que la densidad aparente de G y GB es casi 4 veces la de T. Al mezclarse con T hasta un 50%, los valores llegan a presentar reducciones ligeramente superiores a un tercio.

Para la **capacidad de retención de agua** no se han indicado valores óptimos: su aumento es siempre positivo, a no ser que disminuya demasiado la aireación. La capacidad de retención de agua es el equivalente a la capacidad de campo en suelos e indica la cantidad de agua que queda en el sustrato cuando, tras saturarlo, se deja drenar libremente, expresada en forma gravimétrica (g/100g). En este caso, el mayor valor corresponde a T, siendo hasta 3.5 veces el de G y GB. No existe una interacción significativa entre los materiales y el grado de dilución de éstos. La principal diferencia entre los valores de CRA se debe a la dilución, mientras que las diferencias por material entre G y GB son menores al 10%. La CRA de G y GB se consigue aumentar hasta 126% diluyéndose con turba a 75%. Las diferencias en este parámetro son mayores que en las dadas por volumen de agua, porque influye más la densidad aparente en la CRA.

Respecto al **espacio poroso total**, se trata del espacio no ocupado por partículas orgánicas o minerales en el sustrato respecto al volumen aparente del mismo, por lo que cuanto menores sean las densidades aparentes y de partícula, mayor será la porosidad. Además, puesto que la porosidad interparticular llega a alcanzar valores máximos de 48% de porosidad, valores superiores corresponderían a la presencia de porosidad interna y abierta de las partículas, características de muchos materiales orgánicos (*Burés, 1997; Fornes et al., 2003*). Ni G ni GB llegan al rango óptimo, necesitando mezclarse con gran proporción de T (más de 50% en volumen) para alcanzarlo. En concreto, el valor mínimo corresponde al de GB. El aumento de EPT en las mezclas sigue un comportamiento casi lineal.

En cuanto a **volumen de agua**, todas las muestras tienen valores similares, dentro del rango óptimo. Los valores más altos corresponden a las mezclas con 25% o 75% de T.

El **volumen de aire** sigue un patrón similar, pero a la inversa. El valor máximo lo presenta T, el cual es 4.4 veces el valor de GB y 1.7 veces el de G. Al mezclar GB con T, se experimenta un aumento casi lineal del volumen de aire, pero al mezclar G con T se produce una disminución en bajas cantidades de T. Aunque las mezclas con T en proporción mayor a 75% tanto para G como GB presentan valores prácticamente iguales, GB no alcanza el rango óptimo hasta la dilución 3. El volumen de aire es una de las propiedades más importantes a tener en cuenta en los sustratos de cultivo, ya que las raíces de las plantas requieren oxígeno para su actividad metabólica y de crecimiento y éste difunde cuatro veces más rápidamente en aire que en agua. Cuando comparamos con un rango óptimo, hemos de atender al valor mínimo, que es el crucial, ya que si se supera sólo afectará a la frecuencia de riego.

Ningún material excede el rango óptimo en **contracción**, estando todos por debajo del valor máximo admisible (<30%), límite establecido para evitar que se produzca en el sustrato rotura de raíces, pérdida de porosidad y anoxia en la zona radical, así como disminución de la eficiencia de riego y fertilidad (*Bunt, 1988*). Aunque los valores de G y GB son sólo ligeramente menores que T, las mezclas pueden hacer variar sustancialmente los resultados. Mezclando GB y, sobretodo, G con un 25% de T, resulta en un aumento de la contracción que disminuye paulatinamente al aumentar la proporción de T en la mezcla.

Junto a unas propiedades físicas adecuadas, que aseguren el anclaje de la planta y el suministro de aire y agua, el sustrato debe proporcionar también los nutrientes minerales que toma la planta de la disolución del suelo. En general, el medio de cultivo interacciona con la solución nutritiva y actúa como reserva de nutrientes, a través de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), que depende en gran medida de la acidez o pH del medio (*Ansorena, 1994*). Por

otro lado, la salinidad hace referencia a la concentración de sales solubles en la disolución del sustrato, midiéndose como conductividad eléctrica. Cuando ésta es elevada hace disminuir la diferencia de potencial osmótico entre el sustrato y los tejidos de la planta impidiendo la absorción de agua por las raíces y pudiendo provocar estrés hídrico. La salinidad también produce fenómenos de toxicidad por la absorción excesiva de iones Cl^- y Na^+ .

Así pues, analizando los parámetros físico-químicos se observa que el **pH** de G y GB es alcalino, alejándose bastante del rango óptimo, siendo T el único que tiene un valor recomendado. Mezclando G y GB con T se reduce progresivamente el pH hasta valores próximos al pH neutro.

En el mismo sentido, el valor de **conductividad eléctrica** es demasiado alto para la mayoría de sustratos con G y GB. Estos no son adecuados para el cultivo de plantas si no se mezcla con gran cantidad de T. La reducción en la CE conforme se mezcla el material con T es lineal, siendo sólo ligeramente elevada en las mezclas con un 75% de T. La salinidad alta de algunos materiales requeriría el lavado de las sales en exceso o la mezcla con otro material no salino, como es la propia T.

La **materia orgánica** representa un reservorio de nutrientes para las plantas ya que es susceptible de sufrir degradación microbiana, liberándose CO_2 y mineralizándose elementos nutritivos para las plantas que contribuyen a la fertilidad del sustrato. En este aspecto, los materiales constituidos por compost presentan bajas proporciones de MO, lejos de los valores recomendados. T presenta el doble de MO que G y GB por lo que cuanto mayor es la proporción de T en el sustrato, mayor es su contenido en MO.

B) Comparación de sustratos conteniendo turba o biochar, y sus mezclas con compost de gallinaza.

Tabla 4.2. Características físicas, fisico-químicas y químicas de los sustratos a base de biochar (B) y turba (T) mezclados con compost de gallinaza (G)

Mat	Dil	DA (kg/m ³)	CRA (g agua/ 100g ms)	EPT (%v/v)	Vag (% v/v)	Vai (% v/v)	Ctr (% v/v)	pH	CE (mS/m)	MO (%)	MM (%)
B	1 ¹	323c	147.4f	80.5d	47.3d	33.2a	1.0f	10.03a	83	74.4b	25.6
B	2	377b	152.9f	77.6f	57.5c	20.1cd	3.7ef	9.84b	334	69.9c	30.1
B	3	370b	155.4ef	79.0e	57.8c	21.1bc	5.2e	9.66c	395	60.0d	40.0
B	4	380ab	159.3ef	79.5e	59.9c	19.6cd	10.3d	9.50d	857	53.8e	46.2
B	5	393a	167.3e	79.3e	65.0b	14.3e	17.9c	9.24e	1082	49.7f	50.3
T	1	113f	583.4a	92.1a	67.4b	24.7b	18.6c	4.16i	6	97.8a	2.2
T	2	187e	384.8b	88.8b	72.2a	16.6de	23.2b	7.04h	364	69.7c	30.3
T	3	293d	279.6c	84.1c	68.7b	13.9e	27.1a	6.84g	694	51.5ef	48.5
T	4	317c	231.8d	83.2c	73.0a	10.2f	28.7a	8.65f	877	50.2f	49.8
T	5	393a	167.3e	79.3e	65.0b	14.3e	17.9c	9.24e	1082	49.7f	51.3
SR		105	815.0	93.1	85.5	7.6	31.3	6.33	37	89.6	10.4
SC		111	701.0	92.7	77.4	15.3	24.4	5.01	26	91.0	9.0
Efec Pr											
Mat	B	369	156.5	79.2	57.5	21.7	7.6	9.65	550b	61.6	38.4
	T	261	329.4	85.5	69.3	15.9	23.1	7.19	605a	63.8	46.2
Dil	1	218	365.4	86.3	57.3	28.9	9.8	7.01	43	86.1	13.9
	2	282	268.8	83.2	64.9	18.3	13.5	8.44	349	69.8	30.2
	3	332	217.5	81.5	63.3	17.5	16.1	8.25	545	55.8	44.3
	4	248	195.5	81.3	66.5	14.9	19.5	9.08	867	52.0	48.0
	5	393	167.3	79.3	65.0	14.3	17.9	9.24	1082	49.7	75.2
Sig St²											
Mat		***	***	***	***	***	***	***	ns	*	
Dil		***	***	***	***	***	***	***	***	***	
Mat x Dil		***	***	***	***	***	***	***	ns	***	
Rango Óptimo											
		<400		>85	30-80	10-30	<30%	5.2-6.3	75-349	>80	

Mat= material; **Dil**= dilución; **Mat x Dil**= interacción del material y la dilución; **Efec Pr**= efectos principales; **Sig St**= significación estadística.

B= biochar; **T**= turba rubia *Sphagnum* sin encalar ni fertilizar; **SR**= Sustrato comercial utilizado para enraizamiento; **SC**= sustrato comercial utilizado para crecimiento.

DA= densidad aparente; **CRA**= capacidad de retención de agua; **Vag**= Volumen de agua; **Vai**= Volumen de aire; **Ctr**= contracción; **EPT**= Espacio poroso total; **CE**= conductividad eléctrica a 25°C; **MO**= materia orgánica; **MM**= materia mineral.

¹Dilución de turba-biochar:compost de gallinaza (%v:v): 1=100:0; 2=75:250; 3=50:50; 4=25:75; 5=0:100.

²Significación estadística: ns, *, **, *** indican no significativo y estadísticamente significativo a $P \leq 0.05$, $P \leq 0.01$, $P \leq 0.001$, respectivamente (prueba de Student–Newman–Keuls).

En material puro, T es la de menor **densidad aparente**, seguida de B y finalmente G. Todos los sustratos cumplen con el rango óptimo. En las mezclas se observa un incremento progresivo de la densidad aparente conforme aumenta la presencia de G.

En cuanto a la **capacidad de retención de agua**, el valor de T es 4 veces el de B, y 3.5 el de G. Mezclando T con G disminuye la CRA conforme aumenta la proporción de G. La mezcla de B con G aumenta ligeramente la CRA conforme aumenta la proporción de G.

T presenta el mayor valor de **EPT**, seguido por B y por G, en ese orden. Las mezclas de B no entran en el rango óptimo de EPT, aunque están relativamente cerca. Cuanto mayor es la proporción de G en las mezclas con B o con T, menor es el valor de EPT, siendo este efecto más notable en las mezclas con T que con B.

Respecto al **volumen de agua**, todos los valores son aceptables. El volumen de agua en B es marcadamente menor que en T y G, y aumenta conforme se incrementa el contenido de G en la mezcla, aunque no hay diferencia significativa entre añadir el 25%, el 50% o el 75% de G. Por otra parte, las mezclas de T con G presentan mayor contenido en agua que los materiales puros. El **volumen de aire** es inverso al volumen de agua, siendo el mayor valor el de B, que excede levemente los valores recomendados.

Todos los materiales y mezclas cumplen con una **contracción** adecuada que no supera el 30%. B tiene el menor valor de contracción, de apenas 1%, mientras que al mezclarlo con G, el aumento en la contracción es mayor cuanto más proporción de G hay. Por otra parte, las mezclas G:T producen incremento en la contracción, por encima de ambos materiales puros.

El **pH** de B es marcadamente alcalino y puesto que G también lo es, sus mezclas resultan excesivamente alcalinas. Tal y como se había comentado anteriormente, T reduce el valor de pH en las mezclas con G, rebajándolo a valores más adecuados.

En cuanto a la **conductividad eléctrica**, ni el material ni la interacción es significativa, pero hay cambios importantes atendiendo a la dilución. Dado que para B y T es muy baja, las mezclas con G en baja proporción mantienen unos valores aceptables para un sustrato. Sin embargo, cuando G se presenta en mayor concentración la conductividad resulta excesiva a causa de su naturaleza orgánica. Es de destacar que las mezclas con B mantienen una conductividad menor que las mezclas con T, sobre todo cuando estos materiales están presentes en una proporción del 50%.

Finalmente, como la **materia orgánica** en G es baja, su mezcla con B y T hace que los sustratos resultantes contengan menos materia orgánica conforme aumenta la proporción de G en los mismos.

4.2. CARACTERIZACIÓN DE SUSTRATOS. PROPIEDADES BIOLÓGICAS.

4.2.1. BIOENSAYOS DE FITOTOXICIDAD

En este apartado se presentan los resultados aportados por los bioensayos de germinación basados en el método de Zucconi *et al.* (1981). Se considera que un material no es tóxico si presenta un índice de germinación superior al 80%, siendo por tanto un posible sustrato para cultivo sin necesidad de mezclar con otro material.

El primer bioensayo corresponde al realizado con semillas de berro, ya que se trata de una especie sensible a la presencia de compuestos fitotóxicos. Los resultados se recogen en la figura 4.2:

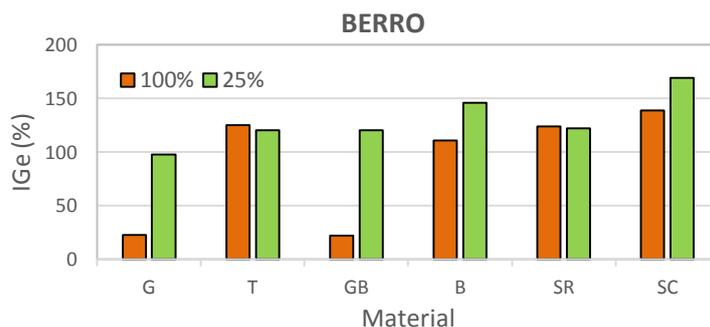


Figura 4.2. Índices de germinación según sustrato, en el bioensayo con berro (*Lepidium sativum* L.): compost de gallinaza (G), compost de gallinaza co-compostada con biochar (GB), turba (T), biochar (B), sustrato comercial de enraizamiento (SR) y sustrato comercial de crecimiento (SC) en estado puro y diluido al 25%.

Se observa en el diagrama de barras que, entre los materiales puros, la gallinaza y la gallinaza co-compostada con biochar están muy alejados del valor límite de 80%. Esto indica que estos materiales son fitotóxicos, y sólo podrían ser componentes de sustrato en una mezcla con otros materiales sin toxicidad. Sin embargo, diluyéndose 4 veces los materiales puros (un 25%) se obtienen resultados adecuados para todos ellos. Los valores del resto de materiales son adecuados, siendo de especial interés el biochar diluido, con un índice de germinación de casi 150%.

Los resultados que superan el 100% reflejan que en el material estudiado hay más crecimiento que en el control. Esto es debido probablemente a la presencia de sustancias que estimulan el crecimiento en los materiales de estudio. En el caso del biochar estas sustancias sólo serían eficientes por debajo de un umbral de concentración determinado.

Por otra parte, el bioensayo realizado con semillas de lechuga permite aportar información sobre la salinidad, ya que es sensible a ella. Al igual que el caso anterior, los resultados se muestran en un diagrama de barras (figura 4.3).

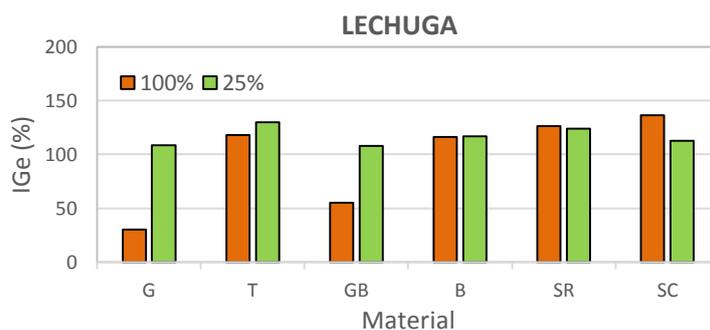


Figura 4.3. Índices de germinación en el bioensayo con lechuga (*Lactuca sativa* L.): compost de gallinaza (G), compost de gallinaza co-compostada con biochar (GB), turba (T), biochar (B), sustrato comercial de enraizamiento (SR) y sustrato comercial de crecimiento (SC) en estado puro y diluido al 25%.

Se deduce de estos resultados unas ideas similares al bioensayo con berro. Ninguno de los dos compost estudiados son buenas opciones como sustrato puro, a causa de su alta salinidad, pero esto se ve solventado en las diluciones al 25%. El biochar presenta un alto índice de germinación, tanto en estado puro como diluido.

Como en el caso anterior, la turba no presenta prácticamente diferencias con los sustratos de vivero puesto que tienen una composición muy semejante.

El hecho de que algunos materiales presenten un índice de germinación menor al ser diluidos probablemente se deba a la alteración de la dosis óptima de los compuestos estimuladores (fenómeno de hormesis). Si la germinación mejora al ser diluido, sería debido a que en estado puro la concentración fuese demasiado alta para un crecimiento óptimo. En el caso contrario, la concentración sería la adecuada en estado puro, y al diluirlo su efecto se ve mermado también.

4.2.2. RESPIROMETRÍA

En este apartado se han dispuesto los datos obtenidos en dos gráficas, correspondientes a consumo de oxígeno (figura 4.4) y producción de dióxido de carbono (figura 4.5) para los 8 materiales tratados: sustratos puros y mezclas al 50%.

A pesar de que algunos materiales aún no se estabilizan tras el periodo de ensayo, se puede prever aproximadamente su comportamiento futuro, ajustándose a una línea de tendencia de tipo logarítmico con R^2 mayor a 0.9 en todos los materiales excepto la turba, el sustrato comercial y el biochar.

Se observan los valores más altos de actividad microbiana en los materiales con mayor proporción de gallinaza, mientras que la turba, el sustrato comercial y el biochar no producían prácticamente respiración durante todo el transcurso de la incubación. Comparando ambas figuras, se observa claramente que el consumo de O_2 va ligado paralelamente a la producción de CO_2 , en todos los materiales excepto en el caso del biochar, en el cual hay consumo de O_2 pero no parece haber producción de CO_2 . Por ello, se sospecha que en el biochar ocurre alguna reacción química relacionada con el secuestro de carbono producido por la respiración de los microorganismos (Fornes et al., 2015).

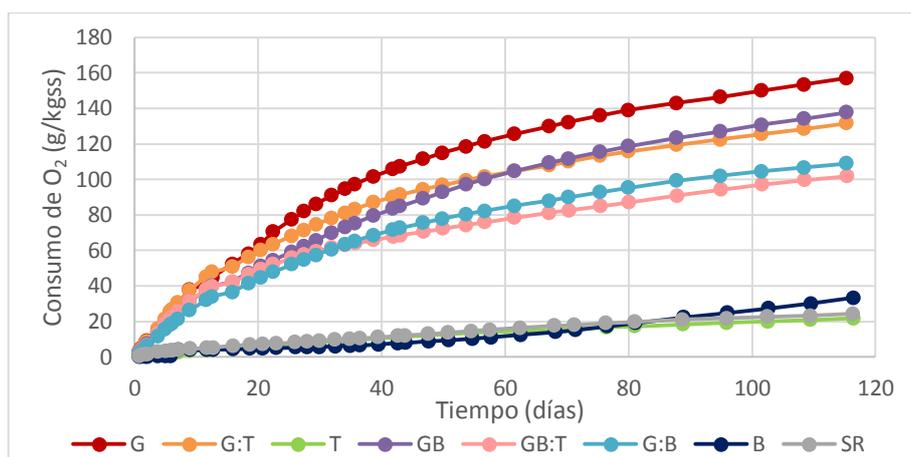


Figura 4.4. Consumo acumulado de O₂ de los diferentes materiales estudiados: compost de gallinaza (G), compost de gallinaza co-compostada con biochar (GB), turba (T), biochar (B) y sustrato comercial de enraizamiento (SR).

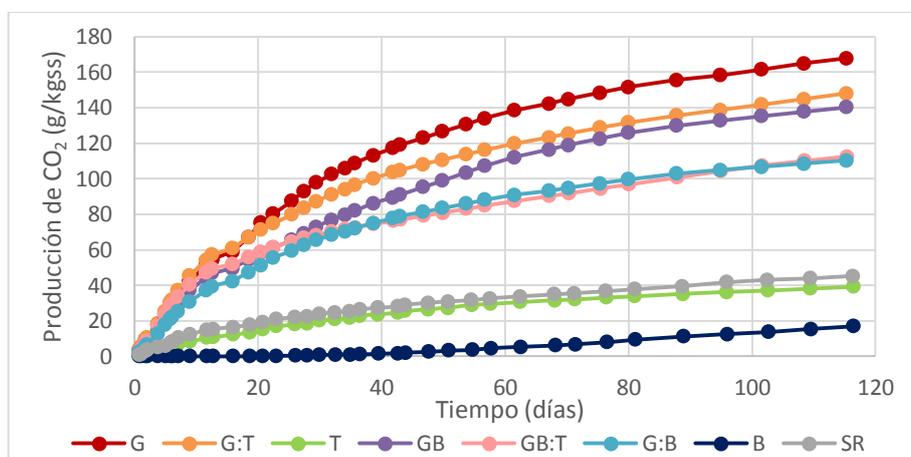


Figura 4.5. Producción acumulada de CO₂ de los diferentes materiales estudiados: compost de gallinaza (G), compost de gallinaza co-compostada con biochar (GB), turba (T), biochar (B) y sustrato comercial de enraizamiento (SR).

Para comprobar la posibilidad de que el biochar secuestrase carbono, se procedió al cálculo de la relación molar entre la tasa de consumo de O₂ y la de producción de CO₂ llevada a cabo por los microorganismos descomponedores de los sustratos. La relación molar puede orientar sobre la naturaleza de los compuestos que están siendo transformados. Si se admite que existe una relación molar O₂/CO₂ de 1 para compuestos como los carbohidratos, y valores ligeramente superiores o inferiores a 1 para compuestos pobres o ricos en oxígeno, respectivamente, si cualquier valor de dicha relación en algún material es muy superior, indicaría un efecto sumidero de CO₂. Los resultados de dichos cálculos se resumen en la tabla 4.3, para diferente número de días desde el inicio de la incubación.

Tabla 4.3. Relación molar O₂/CO₂ para los materiales puros ensayados: compost de gallinaza (G), compost de gallinaza co-compostada con biochar (GB), turba (T), biochar (B) y sustrato comercial de enraizamiento (SR). Se incluye el coeficiente de determinación R² de la regresión lineal entre la producción de CO₂ y consumo de O₂ durante la incubación.

Material	G	GB	B	T	SR
Días	Relación O ₂ /CO ₂				
7	1.20	1.14	-	0.53	0.53
14	1.13	1.18	99.60	0.58	0.53
21	1.16	1.20	47.09	0.56	0.51
28	1.21	1.24	15.46	0.59	0.53
35	1.23	1.26	7.31	0.59	0.55
42	1.24	1.28	6.16	0.63	0.58
49	1.25	1.29	3.93	0.65	0.61
56	1.25	1.28	3.39	0.65	0.65
63	1.25	1.28	3.23	0.66	0.67
70	1.26	1.29	3.12	0.68	0.70
95	1.27	1.32	2.73	0.73	0.71
115	1.29	1.35	2.69	0.76	0.74
R ²	0.9933	0.9947	0.0662	0.9896	0.9775

Se observa en la tabla que el compost de gallinaza presenta el valor más cercano a 1. Este valor aumenta levemente si es co-compostado con biochar, y es muy superior en el caso de sustrato de biochar puro. La turba y el sustrato comercial, prácticamente de igual composición, reflejan relaciones menores a 1, lo que indicaría otro tipo de compuestos oxidados en los que se consume menor cantidad de oxígeno por unidad de CO₂ producida.

Centrándose en el biochar, el valor de la relación disminuye con el tiempo, indicando que la capacidad de absorción de carbono es limitada. R² en el biochar fue prácticamente nulo, puesto que se acercaba más a una polinómica, indicando también que no sigue una regresión normal sino que tiene capacidad por absorber CO₂ y dicha capacidad va disminuyendo con el tiempo de incubación.

Esta propiedad del biochar es de gran interés, pues puede mitigar las emisiones de CO₂ y combatir así el efecto invernadero, aunque requeriría estudios futuros que determinasen la magnitud de capacidad de absorción.

La relación molar fue aumentando a lo largo de la incubación (excepto en el biochar), disminuyendo la tasa de consumo de O₂. Esto se debe probablemente a la descomposición de los distintos compuestos orgánicos existentes en los materiales estudiados, empezando siempre por los más lábiles. Para entender este proceso en profundidad, sería necesario conocer, además de la composición de los materiales, la forma en la que se presentan, ya que esto afecta al comportamiento del material como sustrato (principalmente, macronutrientes como C o N).

4.3. EVALUACIÓN AGRONÓMICA

La planta es el factor más importante a tener en cuenta en la caracterización, evaluación y desarrollo de un nuevo material como sustrato o componente de sustrato para cultivo en contenedor (Abad et al., 2004). La evaluación agronómica estudia la respuesta de un cultivo dado a un sustrato concreto, teniendo en cuenta las características de la planta así como el manejo de su cultivo. En este caso la evaluación agronómica se realizó con *Rosmarinus officinalis*.

4.3.1. ENSAYO DE ENRAIZAMIENTO DE ESTAQUILLAS DE ROMERO

De manera análoga a apartados anteriores, se han presentado los resultados según las dos líneas de estudio en las tablas 4.4 y 4.5.

Tabla 4.4. Efecto de los sustratos a base de compost de gallinaza (G) y gallinaza co-compostada con biochar (GB) mezclados con turba (T) sobre los parámetros de enraizamiento de *Rosmarinus officinalis*.

Mat	Dil	Enraiz (%)	PS tallo (mg)	L tallo (cm)	PS raíz (mg)	L raíz (cm)	P/L raíz
G	1 ¹	9.7	71.5	5.2	4.2	3.1	1.35
G	2	11.3	86.7	5.6	1.0	3.3	0.30
G	3	55.3	114.7	6.4	22.3	5.2	4.29
G	4	90.3	110.7	6.6	33.1	12.0	2.76
G	5	68.0	99.0	5.5	21.5	10.5	2.05
GB	1	4.0	60.0	5.3	0.7	2.2	0.30
GB	2	22.3	48.6	5.1	6.8	4.6	1.48
GB	3	78.0	124.5	6.7	36.2	9.4	3.85
GB	4	100.0	128.2	7.2	34.5	10.8	3.19
GB	5	68.0	99.0	5.5	21.5	10.5	2.05
SR		100.0	127.5	6.1	38.7	10.4	3.72
Efec Pr							
Mat	G	46.9	96.5	5.9	16.4	6.8	2.15
	GB	54.5	92.1	6.0	19.9	7.5	2.17
Dil	1	6.8c	65.7b	5.3b	2.4c	2.6c	0.83
	2	16.8c	67.6b	5.4b	3.9c	3.9c	0.89
	3	66.7b	119.6a	6.5a	29.2a	7.3b	4.07
	4	95.2a	119.5a	6.9a	33.8a	11.4a	2.98
	5	68.0b	99.0a	5.5b	21.5b	10.5a	2.05
Sig St²							
Mat		ns	ns	ns	ns	ns	
Dil		***	***	***	***	***	
Mat x Dil		ns	ns	ns	ns	ns	

Mat= material; **Dil**= dilución; **Mat x Dil**= interacción del material y la dilución; **Efec Pr**= efectos principales; **Sig St**= significación estadística.

G= Compost de gallinaza; **GB**= compost de gallinaza co-compostada con biochar; **SR**= Sustrato comercial utilizado para enraizamiento.

Enraiz= Enraizamiento; **PS**= peso seco; **L**= longitud; **P/L**=relación peso/longitud.

¹Dilución de compost:turba (%v:v): 1=100:0; 2=75:25; 3=50:50; 4=25:75; 5=0:100.

²Significación estadística: ns, *, **, *** indican no significativo y estadísticamente significativo a $P \leq 0.05$, $P \leq 0.01$, $P \leq 0.001$, respectivamente (prueba de Student–Newman–Keuls).

El ANOVA factorial comparando los sustratos que contienen compost de gallinaza (G) con aquellos que contienen compost de gallinaza co-compostada con biochar (GB) se recoge la tabla 4.3. Sólo el factor dilución con T fue significativo, obteniéndose resultados óptimos de enraizamiento y crecimiento de las estaquillas en la proporción de T de 75%, mejores incluso que la T pura para algunos de estos parámetros. Enraizamiento y crecimiento fueron muy pobres en los sustratos a base de los composts puros y mejoraron paulatinamente conforme aumentó la proporción de T en el sustrato. La proporción máxima aceptable de compost G y GB en el sustrato fue del 50%. Aunque no hubo diferencias significativas debidas al tipo de compost, probablemente por la gran variabilidad entre estaquillas, sí que se pudo observar que el enraizamiento y peso de la raíz fue sistemáticamente mayor (hasta el doble en algunos casos) en los sustratos conteniendo GB que en los que contenían G. En cuanto a la relación peso/longitud de la raíz, este es un parámetro de proporción meramente orientativo que no fue sometido a análisis estadístico. Es interesante constatar que esta relación aumentó conforme aumento el peso de la raíz (el mayor desarrollo de la raíz se debió más a una ramificación que a crecimiento en longitud) y que fue para la proporción de 50% tanto de G como de GB donde este efecto fue más marcado. En conclusión, en este caso, el hecho de haber compostado la gallinaza con biochar o sola, aunque afecte a las propiedades de los sustratos fabricados con ambos composts (G y GB), no afectó al enraizamiento y crecimiento de la raíz de las estaquillas de romero.

Tabla 4.5. Efecto de los sustratos a base de biochar (B) y turba (T) mezclados con compost de gallinaza (G) sobre los parámetros de enraizamiento de *Rosmarinus officinalis*.

Mat	Dil	Enraiz (%)	PS tallo (mg)	L tallo (cm)	PS raíz (mg)	L raíz (cm)	P/L raíz
T	1 ¹	68.0bc	99.0	5.5	21.5	10.5ab	2.05
T	2	90.3a	110.7	6.6	33.1	12.0a	2.76
T	3	55.3c	114.7	6.4	22.3	5.2de	4.29
T	4	11.3d	86.7	5.6	1.0	3.3e	0.30
T	5	9.7d	71.5	5.2	4.2	3.1e	1.35
B	1	87.7ab	118.1	6.8	36.7	9.2bc	3.99
B	2	84.7ab	130.4	7.1	36.2	9.1bc	3.98
B	3	50.0c	106.3	6.7	28.1	7.5cd	3.75
B	4	51.3c	95.6	5.4	19.3	4.1e	4.71
B	5	9.7d	71.5	5.2	4.2	3.1e	1.35
SR		100.0	127.5	6.1	38.7	10.4	3.72
Efec Pr							
Mat	T	46.9	96.5	5.9	16.4b	6.8	2.15
	B	56.7	104.4	6.2	24.9a	6.6	3.56
Dil	1	77.8	108.6ab	6.2ab	29.1ab	9.8	3.02
	2	87.5	120.6a	6.8a	34.6a	10.5	3.37
	3	52.7	110.5ab	6.5a	25.2b	6.3	4.02
	4	31.3	91.1b	5.5bc	10.2c	3.7	2.51
	5	9.7	71.5c	5.2c	4.2c	3.1	1.35
Sig St ²							
Mat		*	ns	ns	***	ns	
Dil		***	***	***	***	***	
Mat x Dil		*	ns	ns	ns	*	

Mat= material; **Dil**= dilución; **Mat x Dil**= interacción del material y la dilución; **Efec Pr**= efectos principales; **Sig St**= significación estadística.

B= compost de biochar; **T**= turba rubia *Sphagnum* sin encalar ni fertilizar; **SR**= Sustrato comercial utilizado para enraizamiento.

Enraiz= Enraizamiento; **PS**= peso seco; **L**= longitud; **P/L**=relación peso/longitud.

¹Dilución de turba-biochar:compost de gallinaza (%v:v): 1=100:0; 2=75:25; 3=50:50; 4=25:75; 5=0:100.

²Significación estadística: ns, *, **, *** indican no significativo y estadísticamente significativo a $P \leq 0.05$, $P \leq 0.01$, $P \leq 0.001$, respectivamente (prueba de Student–Newman–Keuls).

Por otra parte, en la tabla 4.5 se analizan los resultados de la comparación de los parámetros de enraizamiento en los sustratos a base de biochar (B) o a base de turba (T) mezclados con compost de gallinaza. En este caso hubo un efecto significativo de la dilución, aumentando en general los parámetros relacionados con el enraizamiento y el crecimiento de la raíz cuando había mayor proporción de B o de T en el sustrato respecto a G. El factor material también resultó significativo para enraizamiento y peso de raíz, obteniéndose mejores resultados con B que con T. Además, se presentó una interacción entre los factores dosis y material debido a que con 75% de G, T no mejoró prácticamente el efecto negativo de G, mientras que B lo mejoró marcadamente (tanto como la del 50% de ambos materiales). De hecho, este sustrato (B 25% + G 75%) fue el que presentó mayor relación peso/longitud de la raíz, indicando una estimulación de la ramificación. Por otra parte, el sustrato B puro dio mejores resultados que el de T pura. En conclusión, en este caso el biochar (B) favoreció el enraizamiento y crecimiento de la raíz de las estaquillas de romero en comparación con la turba (T).

4.3.2. ENSAYO DE CRECIMIENTO EN ROMERO

La tabla 4.6 presenta los resultados de crecimiento de plantas de romero comparando el crecimiento en sustratos que contienen compost de gallinaza (G) o compost de gallinaza co-compostada con biochar (GB) y sus mezclas con turba (T). Como se puede observar, sólo las mezclas conteniendo 50% o menos de ambos composts se han incluido en la tabla. Esto es así porque proporciones superiores dieron lugar a unos índices de supervivencia de las plantas muy bajos. Por tanto, la dilución 1 corresponde a los materiales señalados (G, GB) en su mayor proporción posible (50%).

Tabla 4.6. Efecto de los sustratos a base de compost de gallinaza (G) y gallinaza co-compostada con biochar (GB) mezclados con turba (T) en el crecimiento de *Rosmarinus officinalis*.

Mat	Dil	Alt vástago (cm)	Nº Ramas	PF vástago (g)	Raíz VV (1-4)	Clorofila a (SPAD)	Clorofila b (SPAD)	Clorofila T (SPAD)
G	1 ¹	30.4	13.0	20.0	2.0	71.9	46.1	118.0
G	2	28.3	11.0	21.8	2.6	86.9	65.1	152.0
G	3	20.2	8.7	5.2	1.3	96.8	66.1	162.9
GB	1	26.0	12.3	18.7	2.2	61.6	35.4	97.0
GB	2	24.0	11.0	18.9	2.9	75.9	51.8	127.6
GB	3	20.2	8.7	5.2	1.3	96.8	66.1	162.9
Efect Pr								
Mat	G	26.3	10.9	15.6	2.0	85.2	59.1	144.3
	GB	23.4	10.7	14.2	2.2	78.1	51.1	129.2
Dil	1	28.2a	12.7a	19.3a	2.1b	66.7c	40.8b	107.5c
	2	26.2a	11.0ab	20.3a	2.8a	81.4b	58.4a	139.8b
	3	20.2b	8.7b	5.2b	1.3c	96.8a	66.2a	162.9a
Sig St²								
Mat		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Dil		**	*	***	***	***	***	***
Mat x Dil		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Mat= material; **Dil**= dilución; **Mat x Dil**= interacción del material y la dilución; **Efec Pr**= efectos principales; **Sig St**= significación estadística.

G= Compost de gallinaza; **GB**= compost de gallinaza co-compostada con biochar.

Alt vástago= altura del vástago; **Raíz VV**= Valoración visual de la raíz; **Clorofila T**= clorofila total.

¹Dilución de compost:turba (%v:v): 1=50:50; 2=25:75; 3=0:100.

²Significación estadística: ns, *, **, *** indican no significativo y estadísticamente significativo a $P \leq 0.05$, $P \leq 0.01$, $P \leq 0.001$, respectivamente (prueba de Student–Newman–Keuls).

El ANOVA factorial comparando los sustratos que contienen compost de gallinaza (G) con aquellos que contienen compost de gallinaza co-compostada con biochar (GB) indicó que sólo el factor dilución con T fue significativo. Los parámetros de crecimiento del vástago, altura y peso fueron mejores en los sustratos que contenían compost al 25% o al 50%, indistintamente, que en la turba. La ramificación lo fue en el caso de la dilución al 50%. La raíz presentó un mejor desarrollo con el 25% de compost en el sustrato, seguido por el 50%, que en la turba pura. Sin embargo, la supervivencia de las plantas fue menor en los sustratos con la dilución de 50% de compost por lo que la conclusión sería que los mejores sustratos para el cultivo de romero en maceta serían aquellos que contienen el 25% de compost G o GB. El contenido en clorofila fue mayor en las plantas que crecieron menos, es decir en T, seguido de aquellas que crecían en sustratos con el 25% de compost y finalmente de aquellas que crecían en sustratos con el 50% de compost. Aparentemente no se debió este efecto a una inhibición en la síntesis de clorofilas sino a un efecto de dilución en los tejidos.

Por otra parte, en la tabla 4.7 se analizan los resultados de la comparación de los parámetros de crecimiento y clorofila en los sustratos a base de biochar (B) o a base de turba (T) mezclados con compost de gallinaza.

Tabla 4.7. Efecto de los sustratos a base de biochar y turba mezclados con compost de gallinaza sobre los parámetros en el crecimiento de *Rosmarinus officinalis*.

Mat	Dil	Alt vástago (cm)	Nº Ramas	PF vástago (g)	Raíz VV (1-4)	Clorofila a (SPAD)	Clorofila b (SPAD)	Clorofila T (SPAD)
T	1 ¹	20.2	8.7	5.2	1.3c	96.8ab	66.1a	162.9ab
T	2	28.3	11.0	21.8	2.6a	86.9bc	65.1a	152.0ab
T	3	30.4	13.0	20.0	2.0ab	71.9d	46.1b	118.0c
B	1	13.9	6.0	3.2	2.0bc	90.6abc	68.4a	158.9ab
B	2	25.6	12.0	15.3	2.3ab	101.4a	65.7a	167.0a
B	3	25.7	11.7	15.8	2.0ab	83.7c	56.0ab	139.7bc
Efect Pr								
Mat	T	26.3a	10.9	15.6a	2.0	85.2b	59.1	144.3
	B	21.7b	9.9	11.4b	2.1	91.9a	63.3	155.2
Dil	1	17.1b	7.3b	4.2b	1.7b	93.7a	67.3a	160.9a
	2	27.0a	11.5a	18.5a	2.5a	94.1a	65.4a	159.5a
	3	28.1a	12.3a	17.9a	2.0b	77.8b	51.0b	128.8b
Sig St ²								
Mat		**	ns	*	ns	*	ns	ns
Dil		***	***	***	**	***	*	**
Mat x Dil		ns	ns	ns	ns	*	ns	ns

Mat= material; **Dil**= dilución; **Mat x Dil**= interacción del material y la dilución; **Efec Pr**= efectos principales; **Sig St**= significación estadística.

B= compost de biochar; **T**= turba rubia *Sphagnum* sin encalar ni fertilizar.

Alt vástago= altura del vástago; **Raíz VV**= Valoración visual de la raíz; **Clorofila T**= clorofila total.

¹Dilución de turba-biochar:compost de gallinaza (%v:v): 1=100:0; 2=75:25; 3=50:50.

²Significación estadística: ns, *, **, *** indican no significativo y estadísticamente significativo a $P \leq 0.05$, $P \leq 0.01$, $P \leq 0.001$, respectivamente (prueba de Student–Newman–Keuls).

Los parámetros de crecimiento del vástago, altura y peso, se vieron afectados por los factores material y dilución. Los sustratos a base de T presentaron mejores resultados que los que contenían B. En cuanto a la dilución, los sustratos con T o B puros mostraron peores resultados que las mezclas con G, tanto en crecimiento como en ramificación del vástago. La raíz resultó afectada únicamente por el factor dilución, obteniéndose los mejores resultados en los sustratos que contenían 25% de G. En este caso, aunque no se alcanzó significación estadística, se observó un mejor desarrollo radical con B que con T. Como conclusión se podría decir que el crecimiento de romero en maceta funciona mejor en sustratos que contienen turba que en aquellos que contienen biochar. En cuanto al contenido en clorofila total, hubo un efecto de dilución, siendo el contenido menor en aquellas plantas que crecieron más.

4.3.3. COMPOSICIÓN MINERAL DE LA HOJA

La tabla 4.8 muestra el ANOVA factorial de la composición mineral foliar comparando las plantas cultivadas en los sustratos que contienen G con aquellos que contienen GB. Únicamente en el caso del Fe fue significativo el factor material y no el factor dilución, siendo mayor el contenido de este elemento en las plantas cultivadas en sustratos con G. Para el resto de elementos, con la excepción del Ca, el factor dilución fue significativo, no siéndolo el factor material. El contenido en N, S y Zn fue mayor en las plantas que crecieron menos, es decir, en las cultivadas en T pura. Esto significa que la limitación en el crecimiento no se debió a una carencia de estos elementos, siendo el N el más relevante. El P y el K se presentaron más concentrados en las plantas cultivadas en los sustratos que contenían 25% de G o B, seguido por los que contenían el 50%, y finalmente por el de T pura. En este caso, G podría estar contribuyendo con cantidades importantes de P y K al sustrato que elevarían excesivamente la salinidad en la dosis 50%. B, por su parte, es pobre en estos elementos (Fornes *et al.*, 2015), pero podría estar favoreciendo que los aportados con la fertilización sean más fácilmente absorbidos por la planta. En cuanto al Mg y al Mn se presentaron en mayor concentración en los sustratos que contienen el 50% de G o B. De nuevo ocurriría como con el P y el K, pero como son elementos que se encuentran en menor cantidad en G no se limita su absorción por las plantas a dosis altas del compost.

Tabla 4.8. Nutrientes (% del peso seco) en hoja de *Rosmarinus officinalis* cultivado en sustrato a base de compost de gallinaza (G) o de gallinaza co-compostada con biochar (GB) mezclados con turba.

Mat	Dil	N total (g/100g)	P (g/100g)	K (g/100g)	S (g/100g)	Ca (g/100g)	Mg (g/100g)	Fe (mg/Kg)	Mn (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)
G	1 ¹	1.65	0.43	3.71	0.48	0.77	0.59	80.8	133.2	93.4
G	2	1.75	0.59	3.94	0.47	0.81	0.36	73.7	71.0	95.1
G	3	1.89	0.14	1.21	0.67	0.83	0.39	56.1	114.1	119.0
GB	1	1.76	0.40	3.90	0.52	0.74	0.60	54.0	150.5	84.8
GB	2	1.63	0.50	4.26	0.48	0.58	0.37	45.5	89.6	80.8
GB	3	1.89	0.14	1.21	0.67	0.83	0.39	56.1	114.1	119.0
Efect Pr										
Mat	G	1.76	0.38	2.95	0.54	0.80	0.44	70.2a	106.1	103.1
	GB	1.76	0.34	3.12	0.55	0.72	0.45	51.8b	118.1	94.8
Dil	1	1.71b	0.41b	3.8b	0.50b	0.76	0.60a	67.4	141.9a	90.0b
	2	1.69b	0.55a	4.1a	0.47b	0.69	0.36b	59.5	80.3c	87.9b
	3	1.89a	0.14c	1.21c	0.67a	0.83	0.39b	56.1	114.1b	119.0a
Sig St ²										
Mat		ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns
Dil		*	***	***	**	ns	***	ns	***	**
Mat x Dil		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Mat= material; **Dil**= dilución; **Mat x Dil**= interacción del material y la dilución; **Efec Pr**= efectos principales; **Sig St**= significación estadística.

G= Compost de gallinaza; **GB**= compost de gallinaza co-compostada con biochar.

¹Dilución de compost:turba (%v:v): 1=50:50; 2=25:75; 3=0:100.

²Significación estadística: ns, *, **, *** indican no significativo y estadísticamente significativo a $P \leq 0.05$, $P \leq 0.01$, $P \leq 0.001$, respectivamente (prueba de Student–Newman–Keuls).

Por otro lado, en la tabla 4.9 aparecen los resultados de la comparación del contenido en nutrientes foliares de las plantas cultivadas en los sustratos a base de B o T, mezclados con compost de gallinaza.

Tabla 4.9. Nutrientes (% del peso seco) en hoja de *Rosmarinus officinalis* cultivado en sustrato a base de compost de gallinaza mezclado con biochar (B) y turba (T).

Mat	Dil	N total (g/100g)	P (g/100g)	K (g/100g)	S (g/100g)	Ca (g/100g)	Mg (g/100g)	Fe (mg/Kg)	Mn (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)
T	1	1.89a	0.14de	1.21d	0.67	0.83ab	0.39	56.1b	114.1b	119.0a
T	2	1.75ab	0.59a	3.94a	0.47	0.81ab	0.36	73.7ab	71.0d	95.1bc
T	3 ¹	1.65b	0.43b	3.71a	0.48	0.77b	0.59	80.8a	133.2a	93.4bc
B	1	1.61b	0.10e	1.64c	0.76	1.15a	0.57	92.5a	89.1c	92.2c
B	2	1.86a	0.19cd	2.80b	0.42	0.73b	0.64	57.1b	115.1b	91.6bc
B	3	1.87a	0.22c	2.61b	0.49	0.86ab	0.78	54.9b	136.9a	109.9ab
Efect Pr										
Mat	T	1.76	0.38	2.95	0.54	0.80	0.44b	70.2	106.1	103.1
	B	1.78	0.17	2.35	0.56	0.91	0.66a	68.2	113.7	97.9
Dil	1	1.75	0.12	1.42	0.72a	0.99	0.48b	74.3	101.6	105.6
	2	1.80	0.39	3.37	0.45b	0.77	0.50b	65.4	93.0	93.3
	3	1.76	0.32	3.16	0.48b	0.82	0.68a	67.9	135.1	102.6
Sig St ²										
Mat		ns	***	***	ns	ns	***	ns	ns	ns
Dil		ns	***	***	***	ns	***	ns	***	ns
Mat x Dil		*	***	***	ns	ns	ns	**	**	*

Mat= material; **Dil**= dilución; **Mat x Dil**= interacción del material y la dilución; **Efec Pr**= efectos principales; **Sig St**= significación estadística.

B= compost de biochar; **T**= turba rubia *Sphagnum sin encalar ni fertilizar*.

¹Dilución de turba-biochar:compost de gallinaza (%v:v): 1=100:0; 2=75:25; 3=50:50

²Significación estadística: ns, *, **, *** indican no significativo y estadísticamente significativo a $P \leq 0.05$, $P \leq 0.01$, $P \leq 0.001$, respectivamente (prueba de Student–Newman–Keuls).

El nitrógeno se vio afectado por la interacción entre el material y la dilución. En el caso de T, fue más abundante cuanto menos compost había en el sustrato, mientras que en B sucedió lo contrario.

El contenido en P y K se vio afectado por el factor material, el factor dosis y por la interacción de ambos. En general, el contenido fue mayor en las plantas cultivadas en sustratos que contenían T que en las cultivadas en sustratos con B, aumentando marcadamente en las mezclas de ambos materiales con 50% de G. El S y el Mn resultaron afectados únicamente por el factor dilución pero lo hicieron en sentido contrario. Mientras que el valor para S fue mayor en los sustratos de T y B puros, en el caso del Mn fueron las mezclas con 50% de G donde el contenido en planta fue mayor. En cuanto al contenido en Mg, resultó afectado tanto por el material como por su dilución en el sustrato. Su contenido fue mayor para los sustratos con B que para los constituidos con T y el contenido en planta aumentó desde los sustratos con B y T puros hasta los que contenían el 50% de G. En el caso del Fe, se observó un aumento progresivo desde T pura hasta T con 50% de G, mientras que en los sustratos con B se experimentó una disminución de contenido en planta conforme aumentó la dosis de G en la mezcla. Finalmente, respecto al Zn se observó justo lo opuesto al Fe.

En general, lo que se observó es que aquellos sustratos en los que la raíz se desarrolló escasamente, la absorción y, por tanto, la concentración de algunos elementos en hojas fue baja. Esto fue así para cationes muy solubles y móviles en la planta como son el K y Mg. Lo contrario se observó para los aniones principales como el fosfato (P) y los sulfatos (S) poniéndose de manifiesto que la absorción de aniones y cationes por las raíces se produce mediante mecanismos diferentes.

Comparando los resultados con los datos aportados por un estudio dirigido por Mills (1996), se puede decir que, en general, todos los contenidos de nutrientes foliares en los sustratos estudiados presentan valores similares o mayores a los reflejados en su obra "Plant Analysis Handbook II" (tabla 4.10) para *Rosmarinus officinalis*, excepto el de N, donde son más bajos (2.09-2.52% son los valores reflejados en la obra). Aunque resulta una buena fuente de comparación, hay que tener en cuenta que la época de crecimiento no es la misma para ambos estudios.

Tabla 4.10. Contenido de nutrientes minerales foliares en *Rosmarinus officinalis* cultivado en contenedor en período estival. Extracto de "Plant Analysis Handbook II. A practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide" (Mills et al., 1993).

Nutriente	Presencia
N	2.09-2.52%
P	0.26-0.35%
K	2.36-2.55%
S	0.48-0.69%
Ca	0.17-0.40%
Mg	0.22-0.34%
Fe	39-106 ppm
Mn	22-76 ppm
Zn	39-106 ppm

5. CONCLUSIONES

- Las propiedades del compost de gallinaza y del compost de gallinaza co-compostada con biochar son similares, salvo el volumen de aire que es mayor en el compost de gallinaza co-compostada.
- Las diluciones del compost de gallinaza con biochar permiten aumentar el volumen de aire y disminuir la contracción del sustrato en mayor medida que las diluciones con turba, aunque para disminuir el pH o la conductividad eléctrica, o aumentar el contenido en materia orgánica es mejor diluir con turba.
- Los bioensayos indican fitotoxicidad de los composts de gallinaza y gallinaza co-compostada con biochar pero no del biochar, que incluso podría contener estimuladores del crecimiento. Estos mismos bioensayos ponen de manifiesto que la dilución elimina el efecto fitotóxico, como por otra parte se demuestra en los ensayos agronómicos.
- La respirometría ha demostrado la posibilidad de que el biochar de madera de encina actúe como secuestrante de CO₂.
- La presencia de gallinaza y, aún más, la de gallinaza co-compostada con biochar en bajas concentraciones mejora el enraizamiento y desarrollo de las raíces respecto a la turba, mientras que la dilución del compost de gallinaza con biochar mejora, no sólo, el enraizamiento y desarrollo de la raíz, sino también el del tallo.
- Para el crecimiento de romero los composts de gallinaza y gallinaza co-compostada con biochar han resultado tóxicos, no permitiendo la supervivencia de las plantas. No obstante, en formulaciones que los incluyen en bajas proporciones con turba mejoran los resultados de la turba pura. Por otro lado, la dilución del compost de gallinaza con biochar no mejora la dilución con turba.
- El contenido de nutrientes de la planta es especialmente bajo para nitrógeno en todos los casos, pese a que el material de origen del compost de gallinaza es uno de los de mayor contenido en nitrógeno. Al igual que las plantas que crecen en turba las que crecen en biochar presentan un contenido en nitrógeno, fósforo y potasio bajos, aspecto que mejora cuando intervienen en las mezclas el compost de gallinaza y el de gallinaza co-compostada con biochar.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Abad, M.; Noguera, P.; Bures, S. (2001). National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: case study in Spain. *Bioresource Technology*, 77: 197-200.
- Abad, M.; Noguera, P.; Carrión, C. (2005). Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. En: *Fertirrigación. Cultivos Hortícolas y Ornamentales*. 3ª Ed. Ediciones Mundi-prensa. Madrid. 299-354.
- Abad, M.; Noguera, P.; Noguera, V.; Roig, A.; Cegarra, J.; Paredes, C. (1997). Reciclado de residuos orgánicos y su aprovechamiento como sustratos de cultivo. *Actas de Horticultura*, 19: 92-109.
- Adhikari, B.K.; Barrington, S.; Martinez, J.; King, S.; (2009). Effectiveness of three bulking agents for wood waste composting. *Waste Manage*, 29: 197–203.
- Alburquerque, J. A.; Calero, J. M.; Barrón, V.; Torrent, J.; Del Campillo, M.C.; Gallardo, A.; Villar, R. (2013) El biocarbón como una herramienta para limitar las emisiones de CO₂ y mejorar las propiedades del suelo en el ámbito Mediterráneo. *Sociedad Española de Ciencias Forestales. 6º Congreso Forestal Español*. 10pp.
- Ansorena, J. (1994). *Sustratos. Propiedades y caracterización*. Mundi-Prensa. Bilbao.
- Biel, C.; Savé, R.; Verdaguer, D.; Peñuelas, J.L. (2006). Nuevas tecnologías de producción de plantas en vivero. En: *Calidad de planta forestal para la restauración en ambientes Mediterráneos. Estado actual de conocimientos*. Organismo Autónomo Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. 141-159.
- Brewer, C.E.; Schmidt-Rohr, K.; Satrio, J.A.; Brown, R.C. (2009). Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems. *Environ Prog Sustain Energy*, 28:386-96.
- Bruun, E.W.; Müller-Stöver, D.; Ambus, P.; Hauggaard-Nielsen, H. (2011) Application of biochar to soil and N₂O emissions: potential effects of blending fast-pyrolysis biochar with anaerobically digested slurry. *European Journal of Soil Science*, 62(4):581-9.
- Bunt, A.C. (1988). *Media and mixes for container-Grown Plants: a Manual on the Preparation and Use of Growing Media for Pot Plants*. Unwin Hyman. London (UK).
- Burés, S. (1997). *Sustratos*. Ediciones Agrotécnicas. Madrid.
- Buss, W.; Mašek, O.; 2014. Mobile organic compounds in biochar -a potential source of contamination- phytotoxic effects on cress seed (*Lepidum sativum*) germination. *J. Environ. Manag.*, 137: 111-119.
- Carmona, E.; Abad, M. (2008). Aplicación del compost en viveros y semilleros. En: *Compostaje*. Mundi-Prensa. Madrid. 397-424.
- Choi, S.R.; Lee, C.H.; Lee, H.S.; Shin, W.K.; Lee, Y.S. (1989). The effects of electrical conductivity of soil solution on the germination and regrowth of leaves and roots of several vegetable crops. *Research Reports of the Rural Development and Administration Soil Fertilizer*, 31: 65-82.
- Christian, A. H.; Evanylo, G. K.; Green, R. (2009) *Compost: What is it and what's it to you*. Virginia Cooperative Extension 452-231.
- De Boodt, M.; Verdonck, O.; Cappaert, I. (1974). Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Actas de Horticultura*, 37: 2054-2062.

- Dias, B.O.; Silva, C.A.; Higashikawa F.S.; Roig, A.; Sánchez-Monedero, M.A. (2010) Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: Effect on organic matter degradation and humification. *Bioresource Technology* 101: 1239–1246
- Eklind, Y.; Salomonsson, L.; Wivstad, M.; Rämert, B. (1998). Use of herbage compost as horticultural substrate and source of plant nutrients. *Biol. Agric. Hortic.*, 16: 269-290.
- Fornes, F.; Belda, R. M.; Lidón, A (2015). Analysis of two biochars and one hydrochar from different feedstock: focus set on environmental, nutritional and horticultural considerations. *Journal of Cleaner Production*, 86: 40-48
- Fornes, F.; Belda, R.M. (2014). Aprovechamiento de residuos orgánicos como componentes de sustrato de cultivo. En: *Máster en Gestión, Tratamiento y Aprovechamiento de Residuos (UV)*. Alfa Delta Digital S.L. Valencia.
- Fornes, F.; Belda, R.M.; Abad, M.; Noguera, P.; Puchades, R.; Maqueira, A.; Noguera, V. (2003). The microstructure of coconut coir dusts for use as alternative to peat in soilless growing media. *Aust. J. Exp. Agr.*, 43: 766-770.
- Fornes, F.; Janackova, A.; Sánchez-Perales, M.; Belda, R.M. (2014). Materia orgánica carbonizada como componente de sustrato para el cultivo en contenedor. En: *VII Congreso Ibérico de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas. Innovar y Producir para el Futuro. (F.G.UPM, ed.)* Madrid. 440-445.
- García-Gomez, A.; Bernal, M.P.; Roig, A. (2002). Growth of ornamental plants in two composts prepared from agroindustrial wastes. *Bioresource Technology* 83: 81-87
- Gouin, F.R. (1998). Using compost in the ornamental horticulture industry. En: *Beneficial Co-Utilization of Agricultural, Municipal and Industrial Byproducts*. Kluwer Academic Publishers. Netherlands. 131–138.
- Goyal, S.; Dhull, S.K.; Kapoor, K.K. (2005). Chemical and biological changes during composting of different organic wastes and assessment of compost maturity. *Bioresour. Technol.*, 96: 1584–1591.
- Graber, E.R.; Meller Harel, Y.; Kolton, M.; Cytryn, E.; Silber, A.; Rav David, D.; Tsechansky, L.; Borenshtein, M.; Elad, Y. (2010). Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. *Plant Soil*, 337: 481-496.
- Gruda, N. (2012) Current and Future Perspective of Growing Media in Europe. *Acta Hortic.*, 960: 37-43
- Hart, S.C.; Stark, J.M.; Davidson E.A.; Firestone, M.K. (1994). Nitrogen mineralization, immobilization and nitrification. En: *Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties*. SSSA Book Series 5. Soil Science Society of America. Madison (USA). 985-1018
- Haug, R.T. (1993). *The Practical Handbook of Composting Engineering*. Lewis Publisher, CRC Press. Florida (USA).
- Hernández, T.; García, C. (2003). Estimación de la respiración microbiana del suelo. En: *Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos: medidas de actividades enzimáticas y biomasa microbiana*. Mundi-Prensa. Madrid. 311-346
- Kauffman, N.; Dumortier, J.; Hayes, D. J.; Brown, R. C.; Laird, D. A. (2014). Producing energy while sequestering carbon? The relationship between biochar and agricultural productivity. *Biomass and bioenergy*, 63: 167-176
- Lehmann, J.; Joseph, S. (2010). Biochar for environmental management: an introduction. En: *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan. 1-9

- Libra, J.A.; Ro, K.S.; Kammann, C.; Funke, A.; Berge, N.D.; Neubauer, Y.; Titirici, M.M.; Fühner, C.; Bens, O.; Kern, J.; Emmerich, K.H. (2011). Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*, 2: 89-124.
- López González, G.A. (2007). *Guía de los árboles y arbustos de la Península Ibérica y Baleares*. 3ª ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- López-Real, J. M.; Witter, E.; Midmer, F. N.; Hewett, B. A. O. (1989). Evaluation of composted sewage sludge/straw mixture for horticultural utilization. *Water Sci. Technol.*, 21: 889-897.
- Lumsden, R.D.; Millner, P.D.; Lewis, J.A. (1986) Suppression of lettuce drop caused by *Sclerotinia minor* with composted sewage sludge. *Plant Dis.*, 70: 197-201.
- Luo, Y.; Zhou, X. (2006). *Soil respiration and the environment*. Academic Press. Amsterdam (Netherlands).
- Mahimairaja, S.; Bolan, N.S.; Hedley, M.J.; Macgregor, A.N.; (1994). Losses and transformation of nitrogen during composting of poultry manure with different amendments: an incubation experiment. *Bioresour. Technol.*, 47: 265-273.
- Martínez, F.X. (1992). Propuesta metodológica para la determinación de las propiedades físicas de los sustratos. *Actas de Horticultura*, 11: 55-66.
- Mills, H.A.; Jones Jr., J.B. (1996). *Plant Analysis Handbook. II. A Practical Sampling, Preparation, Analysis, and Interpretation Guide*. MicroMacro Publishing. Athens (USA).
- Moran, R. (1982) Formulae for determination of chlorophyllous pigments extracted with N,N-dimethylformamide. *Plant Physiology* 69: 1376-1381.
- Moran, R.; Porath, D. (1980). Chlorophyll determination in intact tissues using N,N-dimethylformamide. *Plant Physiology*, 65: 478-479.
- Noguera, P (1999). *Caracterización y evaluación agronómica del residuo de fibra de coco: un nuevo material para el cultivo en sustrato*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Puustjarvi, V. (1994). La turba y su manejo en la horticultura. *Ediciones de Horticultura*. Reus.
- Raviv, M.; Chen, Y.; Inbar, Y. (1986). Peat and peat substitutes as growth media for container grown plants. En: *The role of organic matter in modern agriculture*. Martinus Nijhoff Publishers. Dordrecht (Netherlands). 257-287
- Rogovska, N.; Fleming, P.; Laird, D.A.; Cruse, R.; Parkin, T.; Meek, D. (2011) Impact of biochar on manure carbon stabilization and greenhouse gas emissions. *Soil Science Society of America Journal*, 5:871-9.
- Sánchez-Monedero, M.A.; Bernal, M.P.; Antón, A.; Noguera, P.; Abad, A.; Roig, A.; Cegarra, J. (1997). Utilización del compost como sustratos de para semilleros de plantas hortícolas en cepellón. En: *Actas del I Congreso Ibérico y III Nacional de Fertirrigación*. SEFV Ed. Murcia. 78-85

- Steiner, C.; Das, K. C.; Melear, N.; Lakly, D. (2010) Reducing Nitrogen Loss during Poultry Litter Composting Using Biochar. *Journal of Environmental Quality*, 39: 1236-1242.
- Strasburger, E.; Noll, F.; Schenck, H.; Schimper, A. F. W.; Von Denfeer, D.; Ehrendorfer, F.; Bresinsky, A.; Ziegler, H. (1986). *Tratado de Botánica*. 7ª ed. Editorial Marín S.A. Barcelona.
- UNE-EN NORMA ESPAÑOLA. Mejoradores del Suelo y Sustratos de Cultivo. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- UNE-EN 13037 2012. *Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Determinación del pH*.
- UNE-EN 13038 2012. *Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Determinación de la conductividad eléctrica*.
- UNE-EN 13039 2012. *Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Determinación del contenido en materia orgánica y de las cenizas*.
- UNE-EN 13040 2008. *Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Preparación de muestras para ensayos químicos y físicos. Determinación del contenido de materia seca, contenido de la humedad y de la densidad aparente compactada en laboratorio*.
- UNE-EN 13041 2012. *Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Determinación de las propiedades físicas. Densidad aparente seca, volumen de aire, volumen de agua, valor de contracción y porosidad total*.
- UNE-EN 15428 2008. *Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Determinación de la granulometría de las partículas*.
- Vasander, H. (ed) (1996). *Peatlands in Finland*. Finnish Peatland Society. Helsinki (Finland).
- Zibilske, L.M. (1994). Carbon mineralization. En: *Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties*. SSSA Book Series 5. Soil Science Society of America. Madison (USA). 835-864
- Zimmerman, A.R.; Gao, B.; Ahn, M-Y (2011) Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 43:1169-79.
- Zucconi, F.; Forte, M.; Monaco, A.; De Bertoldi, M. (1981a). Biological evaluation of compost maturity. *BioCycle*, 22: 27-29.
- Zucconi, F.; Pera, A.; Forte, M.; De Bertoldi, M. (1981b). Evaluating toxicity of immature compost. *BioCycle*, 22: 54-57.