

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

GRADO EN INGENIERÍA AGROALIMENTARIA Y AGROAMBIENTAL



**“DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE SUSTRATOS PARA SEMILLEROS
DE HORTÍCOLAS”**

TRABAJO FIN DE GRADO

SEPTIEMBRE 2016

Autor: Gabriel García Serna

Tutor/es: Raúl Moral Herrero

María de los Ángeles Bustamante Muñoz

REFERENCIAS DEL TRABAJO FIN DE GRADO

IDENTIFICACIONES:

Autora: Gabriel García Serna

Título: Desarrollo y validación de sustratos para semilleros de hortícolas

Tutor/es: Dr. Raúl Moral Herrero; Dra. María de los Ángeles Bustamante Muñoz

Titulación: Grado en Ingeniería Agroalimentaria y Agroambiental

Tipo de trabajo: Experimental

PALABRAS CLAVES: Cultivo sin suelo, sustratos, cultivos hortícolas, compostaje, fibras residuales y lodos de depuradora.

KEYWORDS: Soilless cultivation, substrates, horticultural crops, composting, residual fibres and sewage sludge.

RESUMEN:

Este trabajo pretendía estudiar el efecto del uso de fibras vegetales, compost y vermicompost como componentes de sustratos de cultivo en sustitución de la turba y la fibra de coco, en los cultivos estudiados (lechuga y brócoli) y en las propiedades de los sustratos elaborados. Para ello, se realizaron dos experimentos diferenciados: a) Experimento 1, en el que se ensayaron mezclas ternarias utilizando diferentes proporciones de un compost de origen vegetal, un vermicompost de origen agroalimentario y fibra de coco, ensayando estas mezclas sobre un cultivo de lechuga y otro de brócoli; b) Experimento 2, en el que se ensayaron mezclas binarias combinando en todas ellas la fibra de coco con restos de hoja de palmera, con restos de tronco de palmera picado y 2 compost de lodo EDAR y residuo de palmera (hoja y tronco) en un cultivo de lechuga. Ambos experimentos usaron un sustrato comercial de turba como tratamiento control. Para evaluar el efecto de las diferentes mezclas, se analizaron parámetros físicos, físico-químicos y químicos en los sustratos, así como se han analizado parámetros morfológicos y de rendimiento en ambos cultivos.

ABSTRACT:

This work aimed to study the effect of the use of residual fibres, compost and vermicompost as substrate components to substitute peat or coir fibre, on the studied crops (lettuce and broccoli) and on the properties of the studied substrates. Two experiments were carried out: a) Experiment 1: ternary mixtures were elaborated using different proportions of green waste compost, an agri-food derived vermicompost and coir fibre, using these mixtures on lettuce and broccoli crop cultivation; Experiment 2: binary mixtures were prepared using coir fibre mixed with palm leaf waste, palm trunk waste and compost from sewage sludge and palm waste (leaf and trunk) in the cultivation of using a lettuce crop. The control treatment was a commercial peat based substrate. To evaluate the effect of the mixtures, physical, physico-chemical and chemical parameters were determined in the substrates and morphological and yield parameters in both crops.

Agradecimientos

A mis tutores, Raúl y Marian, por su gran esfuerzo y ayuda que han dedicado para poder realizar este trabajo, además de su excepcional paciencia y confianza. Muchísimas gracias.

A Marisol, por la gran ayuda y tiempo que dedicó en el laboratorio.

A Mariló, Aurelia, Enrique, Alberto, Encarni y Jose, por la ayuda prestada los días que se realizaron los muestreos de las plántulas en el laboratorio.

A la empresa Babyplant y sus trabajadores, que permitieron realizar estos ensayos en sus instalaciones, abriéndonos las puertas con total confianza.

ÍNDICE

1. OBJETIVOS Y SÍNTESIS.....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	3
2.1. Sustratos y agricultura.....	3
2.1.1. Tipos de sustratos.....	4
2.1.2. Propiedades de los sustratos.....	14
2.1.3. Problemática y alternativas al uso de la turba.....	19
2.1.4. Materiales alternativos a la turba.....	20
2.1.4.1. Fibras vegetales residuales.....	20
2.1.4.2. El compost y el proceso de compostaje.....	21
2.1.5. Normativa asociada.....	25
3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	31
3.1. Infraestructura utilizada y localización.....	31
3.1.1. Invernadero comercial.....	31
3.1.2. Condiciones del área.....	32
3.2. Características de los materiales utilizados.....	33
3.2.1. Sustrato ecológico comercial.....	33
3.2.2. Compost.....	34
3.2.3. Vermicompost.....	35
3.2.4. Fibras vegetales alternativas.....	37
3.2.4.1. Fibra de coco.....	37
3.2.4.2. Hoja de palmera.....	38
3.2.4.3. Tronco de palmera.....	38
3.3. Material vegetal.....	40
3.3.1. Lechuga.....	40
3.3.1.1. Descripción botánica, taxonómica y fisiológica.....	42
3.3.1.2. Exigencias climáticas y edáficas.....	42
3.3.1.3. Plagas y enfermedades criptogámicas de mayor incidencia.....	43
3.3.1.4. Virosis.....	44
3.3.2. Brócoli.....	44
3.3.2.1. Descripción botánica, taxonómica y fisiológica.....	46
3.3.2.2. Exigencias climáticas y edáficas.....	46
3.3.2.3. Plagas y enfermedades criptogámicas de mayor incidencia.....	47
3.3.2.4. Virosis y enfermedades bacterianas.....	48
3.4. Diseño y desarrollo experimental.....	48
3.4.1. Diseño y desarrollo experimental.....	48
3.4.1.1. Experimento 1.....	48
3.4.1.2. Experimento 2.....	52

3.5. Métodos analíticos empleados.....	57
3.6. Métodos estadísticos.....	61
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	63
4.1. Experimento 1.....	63
4.1.1. Características de los sustratos.....	63
4.1.2. Efectos sobre el material vegetal.....	73
4.1.2.1. Lechuga.....	73
4.1.2.2. Brócoli.....	79
4.2. Experimento 2.....	84
4.2.1. Evaluación del efecto de los sustratos utilizados sobre las plántulas de lechuga mediante diferentes tipos de análisis estadísticos multivariantes.....	84
5. CONCLUSIONES.....	91
6. BIBLIOGRAFÍA.....	93

Índice de figuras

Figura 2.1 Etapas del proceso de compostaje.....	24
Figura 3.1 Temperaturas medias anuales durante el periodo 2015-2016 en el término municipal de Orihuela.....	32
Figura 3.2 Detalle de los materiales utilizados.....	37
Figura 3.3 Detalle de los materiales utilizados. a) Fibra de coco; b) Sustrato comercial; c) Hoja de palmera; d) Tronco de palmera.....	39
Figura 3.4 Diseño experimental del Experimento 1.....	50
Figura 3.5 Temperaturas durante el desarrollo del Experimento 1.....	51
Figura 3.6 Diseño experimental del Experimento 2.....	54
Figura 3.7 Temperaturas durante el desarrollo del Experimento 2.....	56
Figura 4.1 Efecto de los diferentes tratamientos sobre el pH de los sustratos estudiados	63
Figura 4.2 Efecto de los diferentes tratamientos sobre la conductividad eléctrica de los sustratos estudiados.....	64
Figuras 4.3 Incidencia de los tratamientos establecidos sobre la densidad real de los sustratos ensayados.....	65
Figuras 4.4 Incidencia de los tratamientos establecidos sobre la densidad aparente, densidad aparente compactada y densidad real de los sustratos ensayados.....	66
Figura 4.5 Incidencia de los tratamientos establecidos sobre el espacio poroso total de los sustratos ensayados.....	67
Figura 4.6 Incidencia de los tratamientos establecidos sobre la contracción en volumen de los sustratos ensayados.....	68
Figura 4.7 Incidencia de los tratamientos establecidos sobre la capacidad de retención de agua de los sustratos ensayados.....	69
Figura 4.8. Incidencia de los tratamientos establecidos sobre la capacidad de aireación de los sustratos ensayados.....	70
Figura 4.9. Incidencia de los tratamientos establecidos sobre la germinación en el cultivo de la lechuga de los sustratos ensayados.....	74
Figura 4.10. Incidencia de los tratamientos establecidos sobre el crecimiento en altura en el cultivo de la lechuga de los sustratos ensayados.....	75
Figura 4.11. Incidencia de los tratamientos establecidos sobre la germinación en el cultivo de brócoli de los sustratos ensayados.....	79
Figura 4.12. Incidencia de los tratamientos establecidos sobre el crecimiento en altura en el cultivo de brócoli de los sustratos ensayados.....	80
Figura 4.13. Componentes principales (PC1 y PC2) obtenidos al realizar el análisis de componentes principales (PCA) a los parámetros considerados.....	86
Figura 4.14. Resultados del análisis jerárquico de clúster realizado a los tratamientos.....	87
Figura 4.15. Contribuciones de los tratamientos utilizando las Componentes 1 y 2 obtenidas del análisis no-jerárquico de clúster.....	89

Índice de tablas

Tabla 2.1 Materiales que pueden utilizarse como sustratos y su origen.....	6
Tabla 2.2 Propiedades de las turbas.....	8
Tabla 2.3 Principales propiedades de los sustratos.....	15
Tabla 2.4 Intervalos óptimos para las propiedades físicas de los sustratos de cultivo.....	16
Tabla 2.5 Intervalos óptimos para las propiedades físico-químicas y químicas de un sustrato de cultivo.....	17
Tabla 2.6 Características de los sustratos cuyo origen es compost vegetal.....	27
Tabla 2.7 Características de los sustratos cuyo origen es fibra de coco.....	28
Tabla 2.8 Características de los sustratos cuyo origen es vermicompost.....	28
Tabla 2.9 Límites máximos de metales pesados en sustratos.....	29
Tabla 2.10 Requisitos mínimos exigidos para un compost del RD 506/2013.....	30
Tabla 3.1 Características del sustrato comercial utilizado.....	33
Tabla 3.2 Características físicas del sustrato comercial utilizado.....	34
Tabla 3.3 Características físico-químicas y químicas de los compost y el vermicompost utilizados en los Experimentos 1 y 2.....	36
Tabla 3.4 Propiedades físicas de los compost y el vermicompost utilizados.....	36
Tabla 3.5 Características físico-químicas y químicas de las fibras vegetales utilizadas.....	39
Tabla 3.6 Características físicas de las fibras vegetales utilizadas.....	40
Tabla 3.7 Superficie, rendimiento y producción del cultivo de lechuga en España en 2014.....	41
Tabla 3.8 Superficie, rendimiento y producción del cultivo de brócoli en España en 2014.....	45
Tabla 3.9 Porcentajes (v/v) de los componentes usados en las mezclas ensayadas.....	49
Tabla 3.10 Acciones realizadas durante el Experimento 1.....	50
Tabla 3.11 Porcentajes de cada uno de los materiales en las mezclas ensayadas.....	53
Tabla 3.12 Acciones realizadas durante el Experimento 2.....	55
Tabla 4.1. Características químicas de los diferentes sustratos ensayados.....	71
Tabla 4.2. Concentración de iones solubles de los diferentes sustratos ensayados.....	72
Tabla 4.3. Producción de biomasa de lechuga de los diferentes sustratos utilizados.....	76
Tabla 4.4. Ratios de parte aérea y raíz de lechuga en los diferentes sustratos utilizados.....	77

1. OBJETIVOS Y SÍNTESIS

El sector del cultivo sin suelo cada vez exige un volumen mayor de materiales cuyo rol principal es el de servir de soporte al cultivo vegetal y adicionalmente de medio que permita el correcto intercambio de fluidos (agua y aire), así como una adecuada nutrición mineral de las plantas.

Actualmente, la turba *Sphagnum* constituye uno de los principales componentes de los medios de cultivo del sector, ya sea en cultivos en semillero o en contenedor debido a sus propiedades que hacen este material como idóneo para este uso. Sin embargo, el proceso de obtención de la turba implica un importante impacto medioambiental a nivel de emisión de gases de efecto invernadero y de pérdida de recursos naturales, ya que se puede considerar como un recurso no renovable si se considera su tasa de reposición con respecto a su tasa de extracción.

Por ello, es esencial buscar nuevos materiales con características similares a la turba que permitan su uso en medios de cultivo. En este sentido, el uso de los residuos orgánicos (frescos o compostados) como sustitutos totales o parciales de la turba puede suponer no sólo la gestión de estos residuos, sino también la valorización de los mismos al sustituir a un recurso no renovable como es la turba.

Por ello, en este trabajo fin de grado se plantea como objetivo el estudio de la utilización de mezclas binarias y ternarias compuestas por materiales sostenibles, buscando posibles sustitutos de la turba, comparando la germinación y el desarrollo de las plántulas a nivel comercial de lechuga y brócoli.

Los objetivos concretos de este trabajo fin de grado son los siguientes:

- Realizar ensayos de utilización de sustratos binarios y ternarios como medio de cultivo en semilleros comerciales, empleando diferentes proporciones de componentes más sostenibles que la turba.
- Estudiar la viabilidad de los componentes utilizados en las mezclas realizadas como medio de cultivo adecuado, ya sean estos componentes sin compostar (hoja y tronco de palmera), compostados (compost vegetal, compost de lodos...) o con un alto valor añadido como el vermicompost.
- Optimizar la dosis de cada uno de los materiales utilizados dependiendo del efecto que tienen en cuanto a la germinación y el desarrollo comercial de las plántulas de lechuga y brócoli utilizadas.
- Comparar la germinación, desarrollo morfológico y biomasa de las plántulas obtenidas en los experimentos, para obtener datos que aporten información sobre la relación sustrato-planta que se obtiene para cada mezcla, logrando así, la idoneidad de las proporciones y tipos de componentes más adecuados.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Sustratos y agricultura

En los últimos años, el aumento de la agricultura intensiva ha producido la búsqueda y desarrollo de nuevos medios de cultivo que se comporten de forma adecuada para la obtención de plantas de calidad. Estos medios de cultivo diferentes al suelo suelen estar basados en componentes orgánicos como turbas, fibras de coco, etc. Esto ha provocado que se amplíe el campo de aplicación de los sustratos a otro tipo de cultivos, como plantas ornamentales, hortícolas, arbustivas, etc.

Se denomina “sustrato” a cualquier material sólido y poroso diferente del suelo “in situ” que colocado dentro de un contenedor pueda servir de anclaje a las raíces de la planta y permita una libre circulación del agua y los gases. El sustrato puede ser de naturaleza mineral u orgánica, y con (o sin) actividad química y biológica (sustratos activos o inertes, respectivamente), lo que alterará de alguna manera la disolución nutritiva aportada (Abad y col., 1992).

Desde un punto de vista hortícola, la finalidad de cualquier sustrato de cultivo es producir una planta de calidad en el período de tiempo más corto posible, con los menores costes de producción. Además, la obtención y eliminación del sustrato una vez haya sido utilizado, no debe provocar un impacto ambiental de importancia (Abad y col., 1992).

El aumento de la demanda de sustratos se ha producido paralelamente a la toma de conciencia de la población hacia la conservación del medio ambiente y el agotamiento de los recursos no renovables. Este hecho ha favorecido el aprovechamiento de materiales muy diversos que hasta entonces eran considerados como residuos no deseables (p.ej., lodos de depuradora de aguas residuales, orujos de almazara, etc.) o subproductos de escaso valor (residuos de poda, cortezas de árbol, paja de cereales, etc.). Todos estos sustratos además de resultar útiles contribuyen a cerrar el ciclo natural de la materia orgánica y los nutrientes (Ansorena, 1994).

Por tanto, cualquier sustrato que se utilice para la obtención de plantas hortícolas deberá cumplir ciertos requisitos que lo diferencie de los suelos, ya que deberá salvar ciertas limitaciones de espacio para la planta. Los materiales que componen un sustrato se seleccionan en base a su disponibilidad, coste, facilidad de manejo, ausencia de semillas de malas hierbas, insectos, patógenos o ausencia de fitotoxicidad. Un sustrato adecuado debe ser: químicamente inerte, fácil de conseguir, de bajo costo, retentivo, no salino y durable (que no se descomponga o degrade con facilidad), (Chang y col., 2004).

Un medio de cultivo puede dar resultados distintos según el tipo, forma y tamaño del contenedor, especie vegetal, técnicas culturales (riego o fertilizante) o las condiciones climáticas, por lo que la idoneidad de un sustrato está condicionada al manejo de éste y no garantiza que sea siempre la adecuada. Para poder garantizar el éxito de un cultivo, el sustrato debe poder mantenerse como un factor fijo. Y para ello hay que conocer las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus principales componentes además de determinarlas para cada mezcla particular, pues las variaciones suelen ser muy importantes (Burés, 1997).

2.1.1. Tipos de sustratos

El número de materiales que pueden ser utilizados como sustratos es muy amplio así como las distintas mezclas que se realizan para obtener características apropiadas para el cultivo; por ello existen diferentes criterios de clasificación de los sustratos: basados en el origen de los materiales, su naturaleza, sus propiedades, su capacidad de degradación, etc. (Burés, 1997).

a) Según sus propiedades:

- *Sustratos químicamente inertes:* Arena granítica o silícea, grava, roca volcánica, perlita, arcilla expandida, lana de roca, etc. Actúan como soporte de la planta, no interviniendo en el proceso de adsorción y fijación de los nutrientes, por lo que han de ser suministrados mediante la disolución fertilizante.

- *Sustratos químicamente activos*: Turbas rubias y negras, corteza de pino, vermiculita, materiales lignocelulósicos, etc. Sirven de soporte a la planta, pero a su vez actúan como depósito de reserva de los nutrientes aportados mediante la fertilización almacenándolos o cediéndolos según las exigencias del vegetal.

b) Según su naturaleza:

✓ Materiales orgánicos

- De origen natural. Se caracterizan por estar sujetos a descomposición biológica (turbas).
- De síntesis. Son polímeros orgánicos no biodegradables, que se obtienen mediante síntesis química (espuma de poliuretano, poliestireno expandido, etc.).
- Subproductos y residuos de diferentes actividades agrícolas, industriales y urbanas. La mayoría de los materiales de este grupo deben experimentar un proceso de compostaje, para su adecuación como sustratos (cascarilla de arroz, pajas de cereales, fibra de coco, orujo de uva, cortezas de árboles, serrín, virutas de madera, residuos sólidos urbanos, lodos de depuración de aguas residuales, etc.).

✓ Materiales inorgánicos

- De origen natural: Se obtienen a partir de rocas o minerales de origen diverso, modificándose muchas veces de modo ligero, mediante tratamientos físicos sencillos. No son biodegradables (arena, grava, tierra volcánica, etc.).
- Transformados o tratados: Se obtienen a partir de rocas o minerales, mediante tratamientos físicos, más o menos complejos, que modifican notablemente las características de los materiales de partida (perlita, lana de roca, vermiculita, arcilla expandida, etc.).
- Residuos y subproductos industriales: Encontramos los materiales procedentes de muy distintas actividades industriales (escorias de horno alto, estériles del carbón, etc.).

c) Según su origen

Los sustratos pueden estar constituidos por diferentes tipos de materiales, fundamentalmente residuos de carácter orgánico. En la Tabla 2.1 se muestran algunos de los materiales que potencialmente pueden utilizarse como sustratos y su origen.

Tabla 2.1. Materiales que pueden utilizarse como sustratos y su origen.

Origen	Productos
Industria de la madera	Corteza, serrín, viruta.
Residuos urbanos	Hojarasca, lodos de depuradora, residuos de jardinería, residuos sólidos urbanos.
Industria textil	Residuos de lino, lana y algodón.
Industria ganadera	Gallinaza, estiércol de porcino, paja.
Industria alimentaria	Desechos de soja, residuos de frutas, café y lúpulo, paja, fibra de coco, cascarilla de arroz.
Industria del tabaco	Polvo y restos de hoja del tabaco.
Recursos naturales	Turba, grava, puzolana, arena, esquistos, materiales volcánicos.
Industria del papel	Corteza y lodos de depuración.
Industria siderúrgica	Escorias de fundición.

La elección de un determinado material va a depender por orden de prioridad de la disponibilidad del mismo, de las condiciones climáticas, de la finalidad de la producción y especie cultivada, de sus propiedades, del coste, de la experiencia de manejo, homogeneidad, de la dedicación al sistema y de las posibilidades de instalación.

Sustratos orgánicos

Desde el punto de vista agrícola, los sustratos más utilizados según su origen son los sustratos de origen orgánico, que son aquellos en los que centra este trabajo. Dentro de los sustratos de tipo orgánico se engloban tanto materiales tradicionalmente utilizados, como en el caso de la turba, así como nuevos materiales tales como residuos orgánicos (frescos o compostados), que presentan características similares a

las de la turba. En este sentido, el crecimiento de la población mundial, y con ello, el aumento de la demanda de alimentos y productos de primera necesidad, ha condicionado el incremento de la superficie de cultivo y la mejora de las técnicas de producción agrícola. Gracias a la intensificación del sector agrícola, ganadero e industrial, se ha aumentado la generación del volumen de residuos.

Así mismo, la población cada vez está más concienciada con la sostenibilidad de la producción de los alimentos y productos de primera necesidad, esto ha llevado a métodos de valorización de los residuos y subproductos de las diferentes actividades humanas, agrícolas e industriales. Esto ha implicado que algunos de estos residuos puedan ser gestionados mediante su uso (fresco o compostado) en agricultura, ya sea como enmienda orgánica o como sustrato o componente de sustratos de cultivo. A continuación, se describen los sustratos orgánicos más utilizados:

- **Turbas**

Las turbas son el material más utilizado como sustrato hortícola en los últimos años, pero también el más escaso al no ser considerado un recurso no renovable, debido a que el proceso natural de formación requiere de zonas pantanosas y húmedas, lo que conlleva a una limitación geográfica en su extracción.

La turba se define como la forma disgregada de la vegetación de un pantano, descompuesta de modo incompleto a causa del exceso de agua y la falta de oxígeno, que se va depositando en el transcurso del tiempo, lo que favorece la formación de estrato más o menos densos de material orgánico, en los que se pueden identificar los restos de diferentes especies vegetales (Penningsfeld y Kurzmann, 1983). La Tabla 2.2 muestra las propiedades medias de las turbas más utilizadas en agricultura.

Tabla 2.2. Propiedades de las turbas.

Propiedades	Turbas rubias	Turbas negras
Densidad aparente (g/cm ³)	0,06-0,1	0,3-0,5
Densidad real (g/cm ³)	1,35	1,65-1,85
Espacio poroso (%)	≥94	80-84
Capacidad de absorción de agua (g/100 g m.s.)	1,049	287
Aire (% vol)	29	7,6
Agua fácilmente disponible (% volumen)	33,5	24
Agua de reserva (% vol)	6,5	4,7
Agua difícilmente disponible (% vol)	25,3	47,7
Capacidad de cambio catiónico (meq/100g materia orgánica)	110-130	≥250

Fuente: Fernández y col. (1998).

Las turberas suelen tener dos modos de formación:

- En el seno de las aguas freáticas (lagos, lagunas etc.), bajo la influencia de las aguas subterráneas y las superficiales.
- En los terrenos encharcados de modo permanente, fuera del contacto con las aguas freáticas, que se alimentan exclusivamente de las precipitaciones atmosféricas.

Y su clasificación será en función de su tipo de formación, y se denominan turbas altas o turbas bajas:

Turbas bajas o eutróficas

Estas turbas poseen buenos niveles de Ca y N, y son de reacción ligeramente ácida a neutra. Las propiedades físicas y químicas de este tipo de turbas no las hace adecuada para el cultivo en bandejas, por su baja capacidad de retención de agua disponible, elevada salinidad, etc., por lo que es necesaria su mezcla con otros materiales así como adecuar su compostaje.

Turbas altas u oligotróficas

Son turbas que se dan en países nórdicos, por lo que se han formado con frías temperaturas y altas precipitaciones. Estas condiciones climáticas hacen que esta turba sea pobre en elementos nutritivos y tenga un pH ácido. Este tipo de turba está compuesta principalmente de esfagnos (*Sphagnum* spp). Estos esfagnos retienen cantidades de aguas elevadas, aún después de morir. En función del grado de descomposición, este tipo de turbas se pueden clasificar en:

- Turba ligeramente descompuesta o turba rubia. Es ampliamente utilizada ya que posee unas condiciones físicas y químicas bastante adecuadas:
 - Estructura mullida.
 - Baja densidad aparente.
 - Alta capacidad de retención de agua.
 - Porosidad elevada.
 - Elevada capacidad de intercambio catiónico.
 - Porosidad elevada.

- Turba fuertemente descompuesta o turba negra. Esta turba está fuertemente descompuesta, situándose en los estratos más profundos de las turberas. Entre sus características más destacables se encuentra su elevada composición en nutrientes, así como su baja porosidad.

- ***Fibra y corteza de madera***

La fibra y la corteza de madera son recursos renovables producidos a partir de la madera mediante técnicas especializadas. El origen de la madera puede ser madera fresca o residuos (palets, por ejemplo) que estén libres de sustancias nocivas, tales como metales pesados. Por lo general, la madera de abeto rojo (*Picea* sp.) o de pino (*Pinus* sp.) son las que más se utilizan.

La fibra de madera se hace generalmente de troncos y no contiene apenas partes de corteza. La corteza es una categoría separada de sustrato. La fibra de madera sólo

contiene partes de corteza cuando la madera originaria ha sido descortezada de forma incompleta o no se ha descortezado. Las técnicas para la producción de fibra de madera generalmente consisten en presionar el material a través de una abertura, con presión y temperatura altas. En algunos casos, se trata con vapor de agua (100-120°C). Debido a la fricción en el proceso, el producto se calienta a 80-90°C, por lo tanto está libre de patógenos para las plantas.

Este material se caracteriza por tener un pH que oscila entre 3,8 y 6,6, con una capacidad tampón muy baja que hace que cualquier incorporación de fertilizante o corrector de pH genere cambios importantes. La conductividad eléctrica presenta valores muy bajos. Respecto al contenido en nutrientes, el contenido en N es muy bajo (Kipp y col., 2000) y los niveles de K, Na y Mg pueden variar. Algunas fibras de madera pueden presentar altos contenidos de P y otros nutrientes extraíbles, lo cual indica la presencia de sitios de cambio en el material. Por otro lado, el contenido en Mn y Zn pueden variar de forma considerable, pero generalmente la presencia de micronutrientes es muy baja.

Respecto a las propiedades físicas, este material presenta un alto nivel de porosidad total y en la mayoría de los casos, un nivel muy alto de capacidad de aireación y un nivel bastante bajo de agua fácilmente disponible. También tiene una tasa de difusión de oxígeno superior a la turba (Clemmenson, 2004). Además, como resultado de la compresión mecánica, las propiedades físicas de la fibra de la madera pueden variar considerablemente. Gruda y Schitzer (2004) observaron pérdidas de volumen del 17-28%, dependiendo del nivel de compresión. A diferencia de la corteza compostada, la fibra de madera no tiene ningún problema con respecto a la fitotoxicidad.

- **Serrín**

El serrín utilizado como sustrato suele proceder de restos originados de forma natural y artificial. El serrín es un material que abunda en España, si bien no tiene un contenido grande en nutrientes, es atractiva su gran facilidad para absorber agua. Esta propiedad se puede aprovechar para su uso en la obtención de plantas con pocos

requerimientos nutritivos, o bien en mezclas con otros sustratos de mayor riqueza y menor capacidad de retención de agua.

- ***Residuos de origen urbano***

Este tipo de residuo, así como sus asimilados, se caracterizan por su heterogeneidad, su creciente volumen de producción y por la tendencia a una valorización de estos materiales, orientada a su reciclado, reutilización y aplicación agrícola. El aprovechamiento de los residuos como sustrato constituye una de las alternativas más satisfactorias, proporcionando un doble beneficio (Pudelski, 1987; Abad y col., 1993):

- ✓ Hortícola, al recuperarse y aprovecharse la materia orgánica y los elementos fertilizantes contenidos en los mencionados residuos.
- ✓ Ambiental, al eliminarse los residuos sin alteración relevante del equilibrio ecológico.

Dentro de los residuos orgánicos de origen urbano se pueden distinguir entre los residuos sólidos urbanos y los lodos de depuradora.

Residuos sólidos urbanos (RSU)

Se entiende por RSU todo desecho producido o generado por núcleos urbanos o centros domiciliarios. Una mala gestión de estos residuos puede generar problemas de contaminación en los suelos, en las aguas y en la atmósfera (Actis y col., 1981). El origen de estos residuos puede ser muy diverso:

- Domicilios.
- Centros y servicios.
- Hospitales, clínicas y ambulatorios.
- Limpieza diaria.
- Muebles, vehículos y otros enseres abandonados.
- Residuos de pequeñas industrias, construcción y otros.

La composición de los RSU es muy heterogénea, una clasificación de estos compuestos es la siguiente:

- RSU fermentables
- RSU combustibles
- RSU inertes

La producción de los distintos tipos de RSU varía según factores como la estación del año, nivel de vida de la población (un alto nivel implica menos residuos fermentables y menos combustibles inertes) (Aguado Alonso, 1997). En España se producen unos 17 millones de toneladas de RSU al año, los cuales están compuestos por un 35-50% de materia orgánica, 25-35% de materias combustibles, 35-55% de humedad y 10-15% de inertes (Ministerio de Medio Ambiente, 2000).

Lodos de depuradora

Los lodos de depuradora se obtienen en la depuración de aguas residuales por eliminación de partículas en suspensión de éstas. Los fangos resultantes son tratados para reducir su volumen y su capacidad de fermentación y así obtener un material más fácilmente manejable y evitar problemas en su posterior utilización o eliminación. La adición al suelo de lodos es una opción económicamente rentable si se optimizan las condiciones de transporte y los equipos empleados para su adición al suelo (Burrowers, 1984).

Una aplicación novedosa de los lodos de depuradora en agricultura es su utilización como sustrato, ya sea para la germinación o el desarrollo íntegro del cultivo en su seno, ya que el lodo de depuradora debidamente compostado puede constituir un ingrediente del sustrato. No obstante, diversos problemas como la elevada presencia de amonio, inadecuada relación C/N, presencia de patógenos, etc. nos induce a no usar estos lodos como único componente en un sustrato hortícola

Sustratos inorgánicos

A continuación se detallan las características de los materiales inorgánicos que han sido tradicionalmente más utilizados como sustratos de cultivo.

- ***Perlita***

La perlita es un material inerte que no se descompone ni biológica ni químicamente. Está compuesta por SiO_2 (73-75%) y Al_2O_3 (11%) y no presenta nutrientes. Este material es una roca volcánica silícea que se distingue de otras rocas volcánicas porque al calentarse a una temperatura de 1000-1200°C aumenta su volumen debido a la presencia de agua combinada con la roca. El producto resultante conforma una estructura celular cerrada, con numerosas indentaciones, lo que le proporciona una gran área superficial y le permite retener agua en las superficies de las partículas. La perlita constituye un material amorfo con 2-5% de agua combinada. La densidad de este material es de 128 kg/m³ cuando la roca original pesaba 1500 kg/m³. La densidad aparente varía entre 0,053 y 0,143 g/cm³. La porosidad total es elevada y oscila entre el 86-96%. La perlita usualmente es utilizada para mezclarla con otros materiales y así conseguir que la mezcla sea más oxigenada. Se comercializan distintos tipos de perlita que se diferencian en la distribución del tamaño de sus partículas y en su densidad. :

- ***Vermiculita***

La vermiculita es un silicato de magnesio, aluminio y hierro, siendo de apariencia parecida a las micas. El material del que proviene la vermiculita se trata en hornos a elevadas temperaturas, durante un corto periodo de tiempo, lo que provoca una evaporación rápida del agua y una expansión de las láminas de hasta veinte veces de su volumen original, en dirección perpendicular a los planos de laminación. La vermiculita tras el proceso industrial sufrido se clasifica en varios grupos, según el tamaño de éstas. Su densidad aparente está entre 0,05-0,192 g/cm³; es un material muy poroso, llegando su porosidad total al 95% del volumen y tiene un pH neutro, aunque debido a la presencia de impurezas de naturaleza magnésica, puede llegar a

presentar una reacción débilmente alcalina. Tiene una elevada capacidad de intercambio catiónico, entre 90-150 meq/100g, muy parecida a las turbas. Contienen índices apreciables de potasio y magnesio. También tiene la capacidad de absorber iones fosfato, y no así el cloro, sulfatos ni nitratos.

- ***Lana de roca***

La lana de roca, es un sustrato obtenido de la fusión a 1500°C de materia mineral, rocas y escorias, transformándose en fibras a las que se incorporan resinas destinadas a mantener su cohesión, así como otra serie de sustancias destinadas a dar al material una gran capacidad de retención de agua. En su composición química se encuentran: sílice (45%), cal (16%) y óxidos de aluminio (14%), magnesio (10%), hierro (8%), sodio (2%), titanio (1%), potasio (1%), manganeso (1%). Es un material inerte y su poder de reacción química es prácticamente nulo. Presenta una baja densidad aparente (0,08 g/cm³), una porosidad total mayor del 95%, una alta capacidad de retención de agua disponible de un 30% y una alta capacidad de aireación mayor del 65%.

La capacidad de retención de la lana de roca es muy débil (tensión entre 10 y 50 cm de columna de agua). Por esta razón la lana de roca no posee capacidad tampón alguna, lo que implica un manejo de precisión de la explotación, tanto a la hora de los riegos como de la nutrición mineral. Un problema de la lana de roca es la heterogeneidad entre lotes, debido a la intervención de múltiples factores en la elaboración de este material.

2.1.2. Propiedades de los sustratos

El sustrato es un sistema de tres fracciones cada una con una función propia: la fracción sólida asegura el mantenimiento mecánico del sistema radicular y la estabilidad de la planta, la fracción líquida aporta a la planta el agua y por interacción con la fracción sólida los nutrientes necesarios, por último, la fracción gaseosa asegura las transferencias de oxígeno y CO₂ del entorno radicular (Lemaire y col., 2005). Esto hace que resulte necesario conocer las propiedades físicas, físico-químicas y biológicas

de los sustratos (Tabla 2.3), pues condicionan en mayor medida los cultivos en contenedor y determinan posteriormente su manejo (López-Cuadrado y col., 2006).

Tabla 2.3. Principales propiedades de los sustratos.

<p>Propiedades físicas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada capacidad de retención de agua fácilmente disponible. • Suficiente suministro de aire. • Distribución del tamaño de las partículas que mantengan las condiciones adecuadas. • Baja densidad aparente. Elevada porosidad. • Estructura estable, impide la contracción(o hinchazón) del sustrato y fluido.
<p>Propiedades químicas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Moderada capacidad de intercambio catiónico. • Suficiente nivel de nutrientes asimilables. Baja salinidad. • Elevada capacidad tampón y capacidad para mantener constante el pH. • Mínima velocidad de descomposición del sustrato.
<p>Otras propiedades</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Libre de semillas de malas hierbas y de patógenos. • Reproductibilidad y disponibilidad. Bajo coste. • Fácil de mezclar. • Fácil de desinfectar y estabilidad ante la desinfección. Resistencia a cambios externos físicos, químicos y ambientales.

Fuente: Raviv y col. (1986); Abad y col. (1993).

Las propiedades físicas en un sustrato son muy importantes debido a que son el factor limitante del uso de un sustrato, ya que estas propiedades no se pueden alterar una vez la planta ha empezado a desarrollarse en el medio de cultivo. En la siguiente tabla (Tabla 2.4), se detallan los intervalos óptimos para las propiedades físicas de un sustrato ideal.

Tabla 2.4. Intervalos óptimos para las propiedades físicas de los sustratos de cultivo. Abad y col. (1992), y Noguera y col. (2003).

Propiedad física	Unidades	Nivel óptimo
Tamaño de las partículas	mm	0,25 - 2,50
Densidad aparente	g cm ⁻³	< 0,4
Densidad de partícula	g cm ⁻³	1,45 - 2,65
Espacio poroso total	% vol	> 85
Retención de agua a potencial:		
-1 kPa	%vol.	55-70
-5 kPa	%vol	31-40
-10 kPa	%vol	25-31
Capacidad de aireación ¹	% vol	20 - 30
Agua fácilmente disponible ²	% vol	20 - 30
Agua de reserva ³	% vol	4 - 10
Agua total disponible ⁴	%vol	24-40
Contracción ⁵	% vol	< 30

¹Contenido de aire a potencial de -1 kPa.

²Contenido de humedad entre potenciales de -1 y -5 kPa.

³Contenido humedad entre potenciales de -5 y -10 kPa.

⁴Contenido humedad entre potenciales de -1 y -10 kPa.

⁵Pérdida de volumen respecto al volumen aparente inicial al secarse a 105 °C.

Además de las características físicas de los sustratos, se deben tener en cuenta las propiedades físico-químicas y químicas. En la Tabla 2.5 se muestran los rangos óptimos de las diferentes propiedades físico-químicas y químicas en un sustrato ideal.

Tabla 2.5. Intervalos óptimos para las propiedades físico-químicas y químicas de un sustrato de cultivo (Abad y col. (1992) y Noguera y col. (2003)).

Propiedad	Unidad	Intervalo óptimo
pH (pasta saturada)	-	5,2 - 6,3
C.E (extracto saturado)	dS m ⁻¹	0,75 - 3,5
Capacidad de cambio catiónico	meq/100g	> 20
Materia orgánica total	%	> 80
Cenizas	%	< 20
Relación C/N	-	20 - 40
Elementos asimilables (extracto saturado):		
N-NO ₃ ⁻	mg L ⁻¹	100 - 199
N-NH ₄ ⁺	mg L ⁻¹	0 - 20
P	mg L ⁻¹	6 - 10
K	mg L ⁻¹	150 - 249
Ca	mg L ⁻¹	> 200
Mg	mg L ⁻¹	> 70
Fe	mg L ⁻¹	0,3 - 3,0
Mn	mg L ⁻¹	0,02 - 3,0
Mo	mg L ⁻¹	0,01 - 0,1
Zn	mg L ⁻¹	0,3 - 3,0
Cu	mg L ⁻¹	0,001 - 0,5
B	mg L ⁻¹	0,05 - 0,5
Cl ⁻	mg L ⁻¹	< 180
SO ₄ ²⁻	mg L ⁻¹	< 960
Na ⁺	mg L ⁻¹	< 115

A continuación, se especifican las propiedades más relevantes asociadas a un sustrato:

- pH

El pH de un sustrato debe ser el idóneo para una óptima asimilación de nutrientes por parte de la planta, por lo tanto, los sustratos deberán tener poder de amortiguación frente a los posibles cambios bruscos de pH.

- **Materia orgánica**

La presencia de materia orgánica en los sustratos provocará mejoras en la estructura física, debido a la mejora de la estabilización de la temperatura, mejora la acción enzimática y aumenta la capacidad de intercambio de nutrientes.

- **Salinidad**

La presencia de altas concentraciones de sales como el sodio, bloquea la absorción de otros cationes monovalentes que si son útiles para la nutrición de las plantas. En los sustratos también bloquea los complejos de intercambio de iones. Un remedio para los sustratos con altas concentraciones de sales, es realizar un lavado con aguas con baja concentración en sales.

- **Porosidad**

La porosidad de un medio de cultivo es el porcentaje de su volumen que no se encuentra ocupado por la fase sólida, la relación entre el volumen de poros y el volumen total que el medio ocupa. Este valor varía en función del tamaño de partícula y los tipos de material.

- **Aireación**

Los sustratos adecuados deben tener una capacidad de aireación óptima, para que el intercambio gaseoso para que el desarrollo de las raíces sea el deseado. Este parámetro es un factor limitante para el uso de un material como sustrato.

- **Capacidad retención de agua**

La capacidad de retención de agua estará determinada por la porosidad, y los tipos de poros que presenten, debido a que la cantidad de micro-poros y macro-poros determina la cantidad de aire y agua que puede asimilar en su interior un sustrato, si son grandes se perderá por gravedad, y si son muy pequeños el agua quedará fuertemente retenida y la planta no será capaz de absorberla.

- **Capacidad de intercambio catiónico**

La capacidad de cambio catiónico (CIC) o cantidad máxima de cationes de todas las clases que es capaz de retener o intercambiar un medio. Se expresa en meq/100g. Valores de CIC >20 meq/100 g se consideran adecuados para la mayoría de los cultivos.

- Densidad

La densidad representa el peso específico del sustrato seco expresado en g/cm^3 . La densidad se utiliza para saber que preparación de mezclas hacer, ejecución del análisis químico en base a volumen.

- Relación C/N

Esta relación permite seguir el ritmo de humificación de la materia orgánica de un medio. Una relación C/N alta, indica una tasa de mineralización baja y consiguientemente habrá que aplicar abonos minerales nitrogenados.

2.1.3. Problemática y alternativas al uso de la turba

Ante el aumento de la utilización de sustratos de calidad compuestos en su gran mayoría por turbas, se origina una cierta problemática tanto de logística como ambiental. Las turberas en España son escasas y de baja calidad, por lo tanto, se ha de importar de otros países, este sería por tanto uno de los problemas de logística, añadiendo el sobrecoste de las turbas debido a su importación. El valor económico estimado de importaciones de este material es superior a 39 millones de euros (IGME, 2010). Las turbas que se importan a España provienen de las turberas de Alemania y del norte de Europa.

La disponibilidad de este material, en un futuro, está continuamente cuestionada por motivos medioambientales, ya que las reservas de turba son difícilmente renovables (GECT, IPS y IMCG, 2002). Además, la turba presenta características conductivas para agentes fitopatógenos, especialmente hongos (Borrero y col., 2004; Cotxarrera y col., 2002). Por el contrario, algunos sustratos orgánicos alternativos son supresores.

El uso de la turba lleva asociado un fuerte impacto medioambiental, derivado de su explotación, ya que es obtenida de las turberas, humedales de alto valor ecológico que actúan como sumideros de C además de almacenar y secuestrar el C atmosférico (Maher y col., 2008). Debido al impacto medioambiental, varios gobiernos están tratando de reducir el uso de la turba como sustrato y enmienda del suelo, así como

para fomentar la reutilización de los residuos orgánicos como componentes del sustrato en lugar de su vertido (Moral y col., 2009). En la UE, la explotación de las turberas provoca una emisión de 21 millones de toneladas de CO₂, el 1-2% de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (Liski, 2008). Esto ha llevado al estudio e implementación de otros materiales que se originan de actividades agrarias, ganaderas o de la actividad humana. Estos materiales en su mayoría, provienen de la valorización de los residuos que se originan en las anteriores actividades y no se han de importar de ningún lugar, puesto que se originan en nuestro país. Entre los materiales alternativos a la turba que actualmente se están estudiando e incluso utilizando, destacan la fibra de coco, distintos tipos de compost, vermicompost y diferentes fibras vegetales residuales.

2.1.4. Materiales alternativos a la turba

2.1.4.1. Fibras vegetales residuales

Las fibras vegetales residuales son residuos vegetales procedentes de diferentes especies, como por ejemplo de especies palmáceas que constituyen flujos residuales normalmente procedentes de las actividades urbanas y periurbanas, no vinculados a procedimientos de reciclaje del sector agrícola.

En el caso específico de las especies palmáceas, la biomasa residual tiene su origen en la práctica de la poda en jardinería pero también en cultivos para su explotación en la producción datilera y otros usos. La poda de las especies palmáceas representa una gran cantidad de biomasa por hectárea y año. A modo de ejemplo, según diversas estimaciones, en Europa existen entre 20 y 100 millones de palmeras de la especie *Phoenix* y entre 10-20 millones de la especie *Washingtonia robusta*, de las que el 40% se encuentran en España.

La gran cantidad de volumen de residuos generados por las especies palmáceas, debido principalmente a su naturaleza y densidad, así como la falta de instalaciones específicas de pre-tratamiento y tratamiento, generalmente llevan a una eliminación

incontrolada con pérdidas significativas de recursos en términos de energía, nutrientes y materia orgánica. En muchos casos se recurre a la quema controlada o incontrolada de los residuos como técnica de gestión de residuos más barata. Esta situación produce emisiones de GEI, directas e indirectas y varios impactos en el medio ambiente y la salud humana, así como aumentar el riesgo de incendio.

Sin embargo, este tipo de materiales, ya sea con un ligero procesado previo, como un picado para reducir el tamaño de partícula, o con un tratamiento de estabilización, como el compostaje, pueden presentar propiedades que los pueden hacer idóneos para su uso como sustratos o componentes de sustratos, tal como se ha visto en diferentes estudios utilizando este tipo de materiales (Ceglie y col., 2015).

2.1.4.2. El compost y el proceso de compostaje

El volumen creciente de residuos orgánicos producido por la sociedad actual unido a la complejidad y el coste de su reciclaje, son los condicionantes que han fomentado la ampliación de los campos de aplicación de dichos residuos. Uno de ellos, de gran importancia por sus beneficios y su potencial de comercialización corresponde a su inclusión como ingredientes en la formulación de sustratos de cultivo (Abad y col., 2008; Bustamante y col., 2008).

El compost puede presentar propiedades físicas, físico-químicas y químicas adecuadas para su uso como sustrato, que lo puede hacer idóneo como sustituto de la turba (Bustamante y col., 2008). De esta forma, poco a poco se van incorporando como sustratos o componentes de sustratos materiales orgánicos alternativos a la turba, como son los compost de residuos orgánicos de ámbito local que abaratan las mezclas, al reducir la proporción de turba importada, sin afectar de modo notable a sus propiedades y calidad (Abad y col., 2001; Fitzpatrick, 2005). De este modo, muchos residuos y subproductos de naturaleza orgánica, convenientemente compostados están siendo utilizados con éxito, puros o mezclados con turba, fibra de coco, etc., como medios para el cultivo sin suelo (Carmona y Abad, 2008).

El proceso de compostaje

El compostaje es un proceso bio-oxidativo controlado, que se desarrolla sobre sustratos orgánicos heterogéneos en estado sólido por la acción de los microorganismos. Requiere una humedad adecuada e implica el paso por una etapa termófila con una producción temporal de fitotoxinas, generando como resultado de la biodegradación dióxido de carbono, agua, sales minerales, así como un producto final llamado compost, con una materia orgánica estabilizada, libre de fitotoxinas y patógenos y con ciertas características húmicas dispuesta para su empleo en agricultura sin que provoque fenómenos adversos (Costa y col., 1991, Zucconi y de Bertoldi, 1987). El compostaje facilita la gestión de los residuos orgánicos, reduciendo su peso, volumen y peligrosidad, permitiendo además reciclar los recursos contenidos en ellos. También puede llevarse a cabo únicamente como tratamiento previo a la incineración o el vertido, ya que al reducir el volumen de los mismos se hacen más manejables y menos contaminantes.

La evolución de la temperatura durante el proceso de compostaje marca las diferentes etapas que nos determinan el grado evolutivo del material compostado. Las etapas que componen este proceso (Fig. 2.1) en condiciones aerobias y el tipo de microorganismos que actúan son las siguientes (Chen e Inbar., 1993):

- a) **Etapa mesófila:** Al comienzo del proceso, la masa está a temperatura ambiente. A medida que la población indígena se multiplica, la temperatura aumenta rápidamente. Es una etapa de marcado carácter mesófilo, en la cual, entre los productos que se forman, destacan los ácidos orgánicos de cadena corta. La acidificación lleva consigo el descenso del valor de pH. La temperatura se eleva hasta alcanzar los 40°C.

- b) **Etapa termófila:** Alcanzados los 40°C, la actividad mesofílica cesa y se entra en una segunda etapa termófila, en la que se distinguen dos fases:

1. *Una fase inicial*, en la cual la temperatura se eleva progresivamente. La acidez del medio evoluciona, apreciándose un aumento del pH, consecuencia directa de la presencia de ión amonio como producto de la degradación. Hay una destrucción de huevos y larvas de insectos, lombrices y semillas. Comienza también la destrucción de bacterias patógenas.

 2. *En una segunda fase*, más lenta, en la que se produce un incremento mayor de la temperatura, pudiéndose alcanzar la cota superior alrededor de los 75°C. Destrucción de bacterias patógenas (paratífus), salmonelas y bacilos intestinales. Desaparición de hongos y bacterias termófilas. El aumento de la temperatura puede provocar pérdidas de nitrógeno en forma amoniacal, lo cual podría provocar que el pH descienda ligeramente.
- c) **Etapa de enfriamiento:** La masa se comienza a enfriar debido a que los materiales fácilmente degradables se han consumido, la reacción se ralentiza y el calor generado es menor que el que se pierde. En esta fase la temperatura desciende y se recuperan las condiciones térmicas precedentes. La liberación de calor es suave y la temperatura desciende hasta alcanzar la del ambiente. El pH no sufre modificación apreciable.
- d) **Etapa de maduración:** Tiene lugar a temperatura ambiente. En esta etapa se producen complejas reacciones secundarias de condensación y de polimerización, las cuales dan lugar al humus como producto final. Se detecta la presencia de sustancias dotadas de actividad antibiótica y la desaparición de gérmenes patógenos. La pérdida de masa y la emisión de calor son escasas.

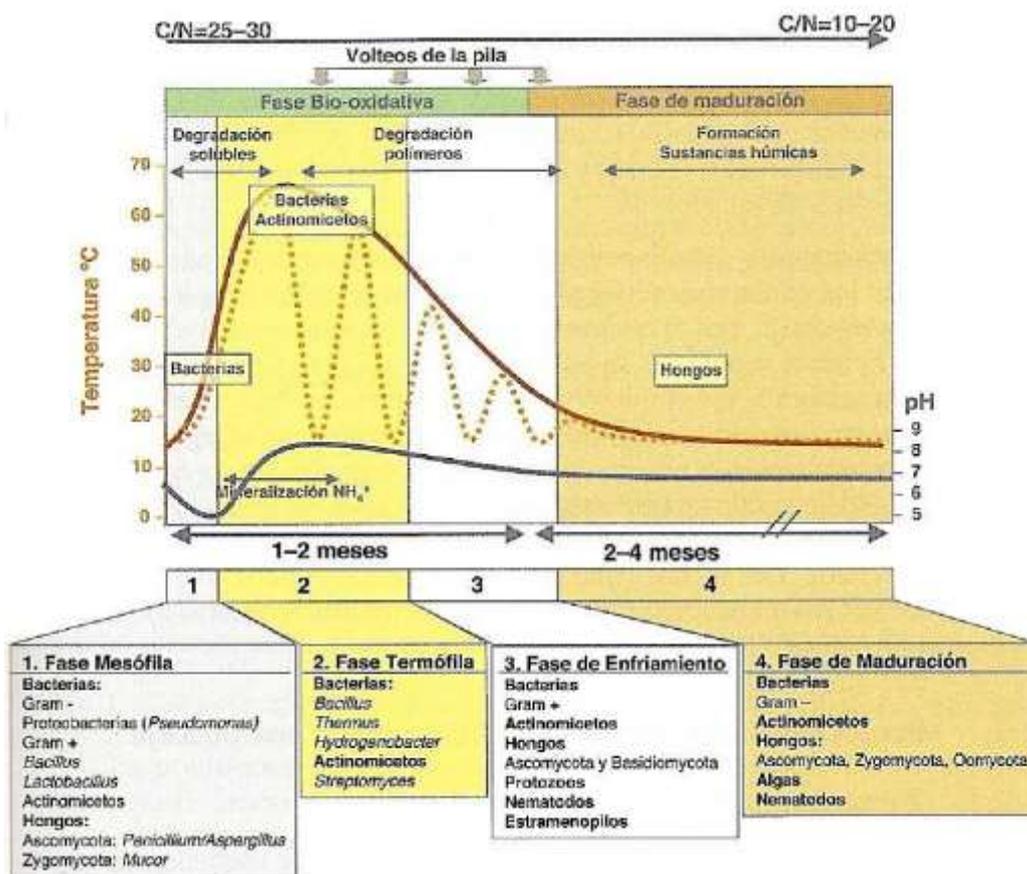


Figura 2.1. Etapas del proceso de compostaje (Moreno y Moral, 2008).

El proceso de vermicompostaje

Por otra parte, encontramos el vermicompost o humus de lombriz, el cual se define como un proceso de bio-oxidación, degradación y estabilización de la materia orgánica, por la acción combinada de las lombrices y microorganismos (bacterias, hongos y actinomicetos mesófilos), mediante el cual se obtiene un producto final estabilizado, homogéneo y de granulometría fina (Martínez Fernández, 2011). La definición de vermicompost del Real Decreto 824/2005, sobre productos fertilizantes, define el vermicompost como el producto estabilizado obtenido a partir de materiales orgánicos, por digestión con lombrices, bajo condiciones controladas.

Las lombrices aceleran la descomposición y humificación de la materia orgánica, mejorando la estructura del producto final, al triturar la materia orgánica a su paso por

el sistema digestivo, reduciendo el tamaño de las partículas y favoreciendo la formación de agregados estables. Por otra parte la actividad de las lombrices aumenta el contenido de nutrientes, convirtiéndolos a través de la actividad microbiana, en formas solubles y asimilables por los cultivos. Asimismo mediante el vermicompostaje se favorece la producción de sustancias que pueden actuar con acción fitohormonal sobre las plantas.

La *Eisenia foetida* y la *Eisenia andrei* han demostrado ser las más eficientes para la biodegradación de residuos orgánicos y las más comúnmente utilizadas. Son los verdaderos agentes biotransformadores de la materia orgánica, modificando la estructura física de los residuos, fragmentando la materia orgánica y aumentando su superficie, lo cual incrementa la actividad de los microorganismos. Además se encuentran involucrados un gran número de microorganismos, fundamentalmente bacterias, hongos y actinomicetos mesófilos. (Martínez Fernández, 2011).

El vermicompostaje es un método de valorización de residuos idóneo porque aporta los siguientes beneficios:

- a) Eliminación de residuos orgánicos nocivos, insalubres, molestos y de difícil gestión.
- b) Generación de un producto final útil, de gran valor como enmienda orgánica del suelo de alta calidad, que puede funcionar como un abono órgano químico.
- c) Producción de una gran biomasa de lombriz, de alto contenido proteico y de alta calidad para alimentación animal.

2.1.5. Normativa asociada

Para obtener sustratos adecuados a la actividad agraria, debemos atender a la normativa específica que nombra los sustratos que son utilizables y los que no. En el Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo definen y tipifican aquellos productos que pueden ser utilizables, y tiene como fines:

- a) Definir y tipificar los sustratos de cultivo, que puedan utilizarse en agricultura, jardinería o paisajismo.
- b) Garantizar que las especificaciones y otras características de los sustratos de cultivo se ajustan a las exigencias de este real decreto.
- c) Prevenir los riesgos para la salud y el medio ambiente por el uso de estos productos.
- d) Establecer el procedimiento para la actualización de los anexos de este real decreto.

Los sustratos de cultivo deberán cumplir los requisitos relativos a sus características, envasado e identificación, puesta en el mercado, materias primas, y demás disposiciones de este real decreto y deberán estar incluidos en la relación de tipos de sustratos del anexo I.

Sólo podrá ser considerado como sustrato de cultivo el que reúna los siguientes requisitos:

- a) Que permita el desarrollo de las plantas de manera eficaz.
- b) Que se disponga de métodos adecuados de toma de muestras y de análisis y de ensayo para comprobar sus características y cualidades.
- c) Que, en condiciones normales de uso, no produzca efectos perjudiciales para la salud y el medio ambiente.
- d) Que no sea portador de plagas ni patógenos causantes de enfermedades de los vegetales.
- e) Que esté libre de semillas y propágulos de malas hierbas. En los tipos: arcilla (2.1), arenas y gravillas (2.5, 2.6, 2.7), tierra natural (2.14) y tierra vegetal (5.2) del anexo I, considerando la naturaleza de estos productos, no se exigirá este requisito.

Los productos que pueden comercializarse como sustratos de cultivo o como componentes de los mismos deben pertenecer a alguno de los grupos incluidos en el anexo I de este Real Decreto; de tal forma que no se pueden poner en el mercado aquellos productos que no se encuentren integrados en uno de los siguientes grupos:

Grupo 1: Productos orgánicos como sustratos de cultivo o componentes de los mismos.

Grupo 2: Productos minerales como sustratos de cultivo o componentes de los mismos.

Grupo 3: Productos de síntesis como sustratos de cultivo o componentes de los mismos.

Grupo 4: Productos preformados como sustratos de cultivo.

Grupo 5: Sustratos de cultivo de mezcla.

Además, en el Anexo I se especifican, para cada uno de los grupos citados, los tipos de productos que lo integran, con indicación de las siguientes características: a) Denominación del tipo de producto, b) Descripción, c) Especificaciones, d) Declaraciones obligatorias y e) Declaraciones opcionales. Así mismo, en este Real Decreto también se pautan las normas para el envasado y etiquetado de los sustratos, su puesta en el mercado y las condiciones de las materias primas a utilizar. Teniendo en cuenta los sustratos de origen orgánico que vamos a utilizar en este trabajo, a continuación se detallarán las características a considerar para cada tipo de sustrato utilizado según el Anexo I de este Real Decreto (Tablas 2.6, 2.7 y 2.8).

Tabla 2.6. Características de los sustratos cuyo origen es compost vegetal.

Denominación del tipo de producto	Compost Vegetal
Descripción	Producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo fase termofílica), exclusivamente de restos de poda, hojas, hierba cortada y restos de vegetales bajo condiciones controladas
Especificaciones	Materia orgánica sobre materia seca >40% (m/m).
Declaraciones obligatorias	<ul style="list-style-type: none"> - Principales componentes (más del 10 % (v/v)), ordenados en orden decreciente de porcentaje. - Materia orgánica sobre materia seca. - Conductividad eléctrica, CE. - pH - Cantidad en volumen.
Declaraciones opcionales	<ul style="list-style-type: none"> - Densidad aparente seca. - Volumen de aire. - Volumen de agua a 1, 5 y 10 KPa. - Materia seca. - Espacio poroso total. - Granulometría.

Tabla 2.7. Características de los sustratos cuyo origen es fibra de coco.

Denominación del tipo de producto	Fibra de Coco
Descripción	Producto procedente de la cáscara del coco
Especificaciones	Materia orgánica sobre materia seca >80% (m/m).
Declaraciones obligatorias	-Especificar si es corteza troceada, fibra, polvo o sus mezclas -Materia orgánica sobre materia seca -Conductividad eléctrica -pH -Cantidad en volumen
Declaraciones opcionales	-Densidad aparente seca -Volumen de aire -Volumen de agua a 1,5 y 10 kpa -Materia seca -Espacio poroso total -Granulometría

Tabla 2.8. Características de los sustratos cuyo origen es vermicompost.

Denominación del tipo de producto	Vermicompost
Descripción	Producto estabilizado obtenido a partir de materiales orgánicos, por digestión con lombrices, bajo condiciones controladas
Especificaciones	Materia orgánica sobre materia seca >30% (m/m).
Declaraciones obligatorias	-Materia orgánica sobre materia seca -Conductividad eléctrica -pH -Cantidad en volumen
Declaraciones opcionales	-Densidad aparente seca -Volumen de aire -Volumen de agua a 1,5 y 10 kpa -Materia seca -Espacio poroso total -Granulometría

Respecto a los límites en el contenido de microorganismos patógenos, se consideran los siguientes aspectos y grupos microbianos:

- a) La materia prima transformada, lista para ser usada como ingrediente de productos orgánicos de origen animal, debe ser sometida a un proceso de higienización que garantice que su carga microbiana no supera los valores máximos establecidos en el Reglamento (CE) n.º 1774/2002.

b) En los sustratos de cultivo de origen orgánico, se acreditará que no superan los siguientes niveles máximos de microorganismos:

Salmonella: Ausente en 25 g de producto elaborado.

Listeria monocytogenes: Ausente en 1 g de materia bruta (únicamente para cultivos cuya producción se consuma en crudo).

Escherichia coli: < 1000 número más probable (NMP) por gramo de producto elaborado.

Enterococcaceae: entre 10⁴ y 10⁵ número más probable (NMP) por gramo de producto elaborado.

Clostridium perfringens: entre 10² y 10³ número más probable (NMP) por gramo de producto elaborado.

Respecto al contenido de metales pesados, los sustratos no deberán sobrepasar los niveles indicados en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9. Límites máximos de metales pesados en sustratos.

Metal pesado	Límites de concentración mg/kg materia seca	
	Clase A	Clase B
Cadmio	0.7	2
Cobre*	70	300
Níquel*	25	90
Plomo	45	150
Zinc	200	500
Mercurio	0,4	1,5
Cromo (total)*	70	250
Cromo (VI)	0,5	0,5

Tal como se indica en la Tabla 2.9, en función de los niveles de metales pesados se establece la siguiente clasificación:

- ✓ **Clase A:** Sustratos de cultivo cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de ellos los valores de la columna A.

- ✓ **Clase B:** Sustratos de cultivo cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de ellos los valores de la columna B. Los productos de la clase B no podrán aplicarse en cultivos hortícolas comestibles.

En el caso de las lanas minerales, no se aplicarán los límites en Cr, Cu y Ni indicados en la Tabla 2.9, puesto que estudios de distintos organismos internacionales reflejan que estos elementos no están disponibles para el suelo ni las plantas en las condiciones de empleo prescritas. En este Real Decreto no se especifica el uso agrícola de compost de lodos de depuradora, por lo tanto, se puede considerar el Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes, que clasifica los compost en diferentes grupos según el contenido en metales pesados (Tabla 2.10).

Tabla 2.10. Requisitos mínimos exigidos para un compost del RD 506/2013.

Parámetro	Real Decreto 506/2013		
Humedad máxima (%)	40		
C/N	< 20		
Metales pesados	Clase A	Clase B	Clase C
(mg/kg m.s.):	0,7	2	3
Cadmio	70	250	300
Cromo (total)	n.d.	n.d.	n.d.
Cromo (VI)	70	300	400
Cobre	0,4	1,5	2,5
Mercurio	25	90	100
Níquel	45	150	200
Plomo	200	500	1000
Zinc	-	-	-
Selenio	-	-	-
Arsénico	-	-	-
Molibdeno	-	-	-
Flúor	-	-	-
Contaminantes orgánicos			
Polifenoles (% p/p)	0,8		
Furfural (% p/p)	0,05		
Microorganismos			
Salmonella spp	Ausente en 25 g de compost		
E. coli	<1000 NMP/g		
Partículas (%)	90 (≤25mm)		
Impurezas (%)	No puede contener		
Gravas y piedras (%)	No puede contener		

n.d.: no detectable según el método oficial; NMP: número más probable.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Infraestructura utilizada y localización

3.1.1. Invernadero comercial

La mayor parte del desarrollo de esta experiencia, así como la preparación inicial de las bandejas, la germinación de las semillas y el desarrollo de las plántulas de lechuga y brócoli se realizaron en los invernaderos pertenecientes a la empresa Semilleros BabyPlant S.L., situados en La Aparecida, término municipal de Orihuela (Alicante). Estas instalaciones poseen una superficie total de 10 ha, de las cuales posee 4,5 ha de invernadero, tipo multitúnel, con una altura de 4,5 m a la canal más 1,8 m a la cumbre. Semilleros Babyplant S.L. es una empresa con una trayectoria de más de 25 años, dedicada a la producción y comercialización de plantas hortícolas en cepellón. Actualmente comercializa todo tipo de plantas hortícolas en cepellón de cultivo convencional o de cultivo ecológico. Por otra parte, poseen otras instalaciones en Santomera (Murcia), que constituyen la sede principal de la empresa y en las cuales disponen de cámaras de germinación y máquinas de siembra.

El experimento se desarrolló en un invernadero multitúnel, con una superficie de 0,7 ha, constituido por una lámina de LDPE fabricada en tricapa de color blanco translúcido de 800 galgas, con una capa exterior resistente y antiadherente, con aditivos contra la radiación UV, y una capa intermedia con alto contenido en EVA para aportar termicidad. La capa interior aportaba difusión a la luz y contenía coestabilizantes resistentes a pesticidas.

El riego se realizó por medio de microaspersores, con un caudal de 40 (L/h). Para ello, se utilizó un sistema de control de riego de última generación, cuya denominación comercial es "Xilema®", el cual permite difundir el agua del modo más homogéneo posible. El agua de riego utilizada procedía de un embalse de 5000 m³ utilizado por esta empresa para abastecer a todos los invernaderos.

Por otra parte, el invernadero utilizado en el experimento tenía un sistema de control climático automatizado, denominado comercialmente "Climatec®". Este sistema controla todos los mecanismos que posee el invernadero para el control climático, como las pantallas térmicas, pantallas de sombreo, las dos ventilaciones laterales, la ventilación cenital y la calefacción por gasoil. El control climático diario estaba monitorizado automáticamente.

3.1.2. Condiciones del área

El semillero se encuentra situado en el término municipal de Orihuela, en la provincia de Alicante, la cual presenta un clima semiárido, con un núcleo árido situado en el entorno de las poblaciones de Orihuela, Albufera, Crevillente y Elche. La distribución de las temperaturas medias mensuales para el término municipal de Orihuela se muestra en la Fig. 3.1:

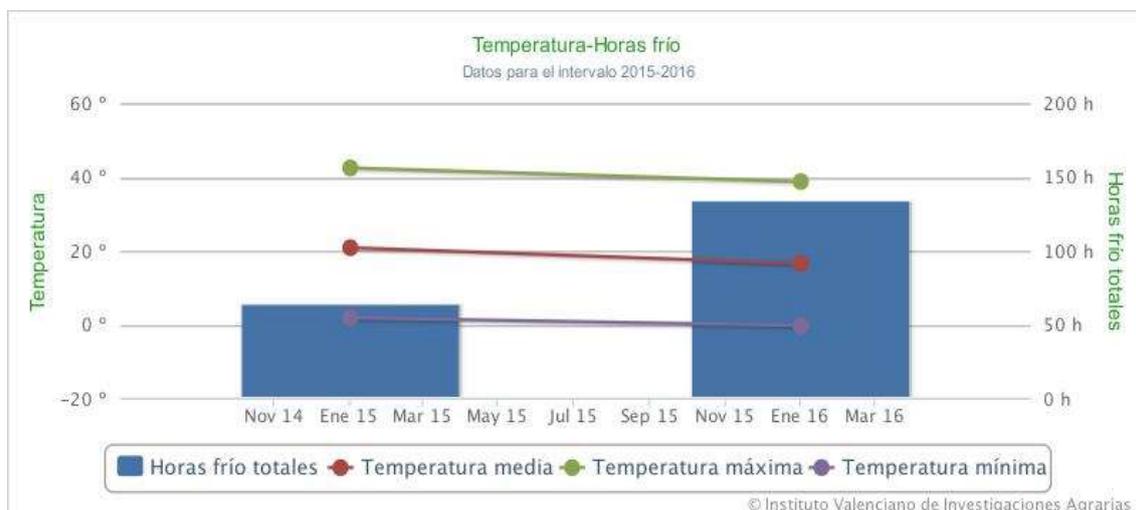


Figura 3.1. Temperaturas medias anuales durante el periodo 2015-2016 en el término municipal de Orihuela. Fuente: Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias.

3.2. Características de los materiales utilizados

3.2.1. Sustrato ecológico comercial

El sustrato ecológico comercial que se ha utilizado como tratamiento testigo o control es el sustrato denominado “Floradur Block Bio[®]”, de la casa comercial “Floragard”, utilizado habitualmente en el semillero donde se ha llevado a cabo este estudio. Está principalmente compuesto por turba rubia poco descompuesta, que aumenta la capacidad de aireación y mejora la estabilidad estructural; turba negra muy descompuesta, que mejora la retención y la absorción de agua y compost de restos vegetales, que aporta nutrientes y aumenta la absorción de agua. Además, contiene carbonato cálcico para corregir el pH, el fertilizante orgánico “Flora Bio-Mix” que aporta nutrientes inmediatamente disponibles. Este sustrato presenta unas características físico-químicas y químicas (Tabla 3.1), idóneas para la germinación y desarrollo de plántulas para semilleros, así como cumple los estándares del reglamento básico (CE) N^o 834/2007 sobre la producción ecológica/biológica de productos ecológicos/biológicos y su reglamento de aplicación (CE) n^o 889/2008 de la Comisión Europea.

Tabla 3.1. Características del sustrato comercial utilizado.

Parámetros	Sustrato comercial
pH (1:5) (v:v)	6,1
Conductividad eléctrica (1:5) (v:v) (dS/m)	0,92
Materia orgánica total (%)	70,9
Carbono orgánico total (%)	34,4
Nitrógeno total (%)	1,24
Relación C/N	27,7
Potasio hidrosoluble (mg/L)	463
Sodio hidrosoluble (mg/L)	407
Nitratos (mg/L)	591
Cloruros (mg/L)	243
Sulfatos (mg/L)	301

Por otra parte, también presenta unas propiedades físicas adecuadas para su uso como sustrato, como se muestra en la Tabla 3.2, al comparar con los rangos de dichas propiedades para un sustrato ideal.

Tabla 3.2. Características físicas del sustrato comercial utilizado.

Propiedades	Sustrato comercial	Intervalo óptimo ¹
Densidad real (g/cm ³)	1,676	--
Densidad aparente (g/cm ³)	0,166	≤ 0,2
Espacio poroso total (%)	90,3	> 85
Capacidad de retención de agua (mL agua/L sustrato)	447	≥ 500
Capacidad de retención de agua (g agua/g sustrato)	270	--
Capacidad de aireación (%)	45,6	20-30
Contracción (%)	19,8	< 30

¹ Intervalo óptimo según Abad y col. (2001).

3.2.2. Compost

En los experimentos desarrollados en este trabajo se han utilizado 3 tipos de compost (CIG-09 en el Experimento 1, CIG-03 y CIG-04 en el Experimento 2) (Fig. 3.2) como componentes en las mezclas ensayadas como sustratos alternativos al sustrato comercial. Dichos compost fueron elaborados en la planta piloto de compostaje COMPOLAB, situada en la Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO), Universidad Miguel Hernández de Elche, mediante el sistema de compostaje de volteo. Las pilas se prepararon utilizando una pala volquete Dumper, mientras que para los volteos que se le realizaron se utilizó una volteadora Backhus 14.28 D.

- *Compost CIG-09*

Este compost está constituido por los restos vegetales derivados de la poda y el control de los jardines de la EPSO (Universidad Miguel Hernández de Elche), constituidos por

especies cespáceas, arbustivas y arbóreas, constituyendo estos ingredientes el 100% de la masa a compostar expresado sobre materia húmeda. El compost se elaboró mediante la técnica de compostaje anteriormente descrita. El compost una vez maduro se tamizó con un equipo de adecuación de granulometría tipo trommel cilíndrico con un 1 cm de paso de luz.

- *Compost CIG-03*

En la elaboración de este compost se utilizó un 26,3% de lodo de depuradora procedente de la EDAR de la pedanía de Algorós, perteneciente al término municipal de Elche (Alicante) y 73,7% de tronco de palmera (*Phoenix dactylifera* L.) picada de dicho municipio, siendo los porcentajes en relación a la materia seca (52,3:47,7 respecto a materia fresca). Este compost se realizó en la planta COMPOLAB mediante las técnicas descritas y el material maduro también fue tamizado a 1 cm de paso de luz.

- *Compost CIG-04*

Este compost se realizó con una mezcla de lodo de depuradora procedente de la EDAR de Orihuela (46.6% en materia seca) y hoja de palmera (*Phoenix dactylifera* L.) picada del mismo municipio, en una proporción de 46,6% de lodo y 53,4% de hoja de palmera, respecto a materia seca (72,3:27,7, respecto a materia fresca). También se elaboró mediante las técnicas anteriormente descritas en la planta COMPOLAB y fue posteriormente tamizado a 1 cm.

3.2.3. Vermicompost

El vermicompost utilizado en las mezclas (Experimento 1) fue elaborado en las instalaciones de una empresa colaboradora situadas en Blanca (Murcia). Este vermicompost se realizó con lodos EDAR procedentes de industrias agroalimentarias, estabilizado con residuos de la industria papelera, mediante la acción de la lombriz roja

de California (*Eisenia foetida*). El vermicompostaje se realizó en pilas estáticas de pequeñas dimensiones, con el suficiente riego para una acción óptima de la lombriz.

Las principales características físico-químicas y químicas de los compost y del vermicompost utilizados en los diferentes experimentos planteados, así como sus propiedades físicas se muestran en las Tabla 3.3 y 3.4, respectivamente.

Tabla 3.3. Características físico-químicas y químicas de los compost y el vermicompost utilizados en los Experimentos 1 y 2.

Parámetros	CIG-09	CIG-03	CIG-04	Vermicompost
pH (1:5) (v:v)	7,7	6,8	6,1	7,1
CE (1:5) (v:v) (dS/m)	5,50	6,51	5,57	2,80
Materia orgánica total (%)	51,4	46,3	60,1	64,2
Carbono orgánico total (%)	25,9	18,8	26,4	21,1
Nitrógeno total (%)	2,40	1,87	3,35	1,58
Relación C/N	10,8	10,1	7,88	13,4
Potasio hidrosoluble (mg/L)	7155	3046	3575	676
Sodio hidrosoluble (mg/L)	1651	1636	1649	776
Nitratos (mg/L)	2738	6730	13718	4486
Cloruros (mg/L)	2759	4011	2898	324
Sulfatos (mg/L)	3701	3781	3765	2605

CE: conductividad eléctrica.

Tabla 3.4. Propiedades físicas de los compost y el vermicompost utilizados.

Propiedades	CIG-09	CIG-03	CIG-04	Vermicompost	Intervalo óptimo ¹
Densidad real (g/cm ³)	1,865	1,916	1,770	2,047	--
Densidad aparente (g/cm ³)	0,358	0,306	0,200	0,445	≤ 0,2
Espacio poroso total (%)	81,0	84,1	88,7	78,5	> 85
CRA (mL agua/L sustrato)	513	657	404	531	≥ 500
CRA (g agua/g sustrato)	144	215	202	144	--
Capacidad de aireación (%)	29,7	18,3	48,2	25,4	20-30
Contracción (%)	18,7	24,4	17,3	24,5	< 30

CRA: capacidad de retención de agua. ¹ Intervalo óptimo según Abad y col. (2001).

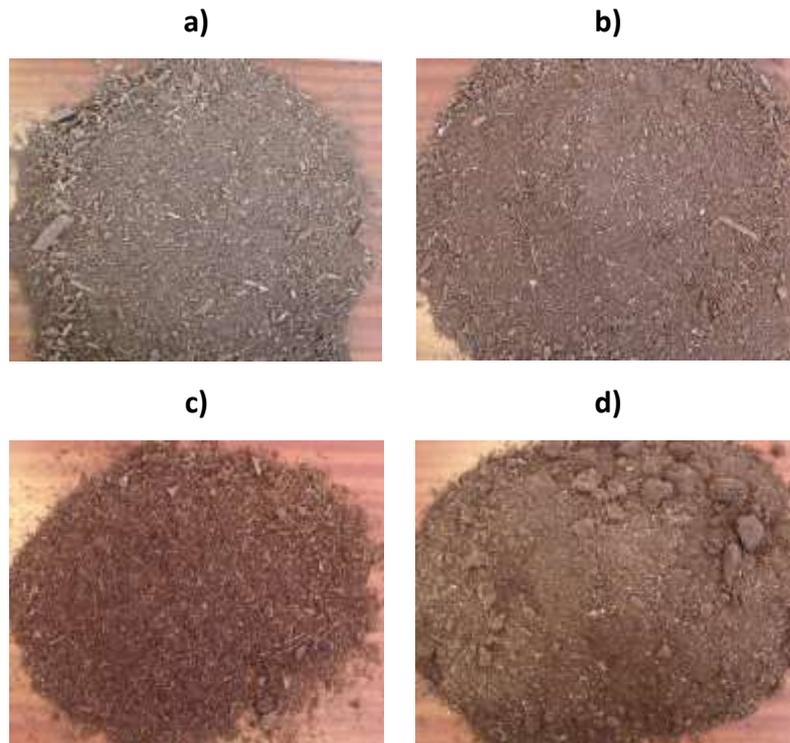


Figura 3.2. Detalle de los materiales utilizados. a) Compost CIG-09; b) Compost CIG-03; c) Compost CIG-04; d) Vermicompost.

3.2.4. Fibras vegetales alternativas

Las fibras alternativas que se han utilizado en este trabajo han sido la fibra de coco, así como la hoja y el tronco de palmera picada (Fig. 3.3). En estos últimos años se han probado y estudiado diferentes tipos de fibras de origen vegetal para realizar el cultivo con sustratos libres de turba o con un contenido mínimo de ella. A continuación se detallan cada una de ellas.

3.2.4.1. Fibra de coco

La fibra de coco es un subproducto del procesado del coco que se obtiene a partir del triturado de las fibras del coco. Este material es lavado previamente con aguas muy bajas en sales debido a su alta salinidad inicial, para obtener unas fibras con una conductividad eléctrica muy baja. La fibra de coco se presenta en forma de ladrillos prensados y secos, que han de humectarse para que las fibras se expandan y puedan ser utilizadas. Suele emplearse como material parcial de sustratos, puesto que mejora

la esponjosidad, la oxigenación y la retención de nutrientes, aparte de aportar inercia térmica y química, además de ser biodegradable. Los lotes (fibra de coco 1, para el Experimento 1 y fibra de coco 2, para el Experimento 2) que se han utilizados procedían de la empresa “Turbas y Cocos del Mar Menor S.L.”.

3.2.4.2. Hoja de palmera

Los restos de hoja de palmera procedían de la poda de la especie *Phoenix dactylifera* L. del municipio de Orihuela. El procesado previo de este material constó de un secado previo al aire y posterior reducción de tamaño de partícula. Para ello, se realizó un primer troceado con un apero de molino de martillos de diamante acoplado a un tractor. Posteriormente, para conseguir un tamaño más de partícula menor, se utilizó un triturador de molino de martillos. Tras estos troceados, se utilizó un molino de corte con una criba de 1 cm de diámetro. Una vez finalizado el troceado del material, se utilizó un tamiz con un tamaño de poros de 0,5 cm, obteniendo así un material con el tamaño de partícula adecuado para su uso como componente de sustratos de cultivo.

3.2.4.3. Tronco de palmera

El tronco de palmera utilizado provenía de palmeras (*Phoenix dactylifera* L.), procedentes del municipio de Elche. Para su uso como componente de sustratos, el material fue también previamente procesado, al igual que la hoja de palmera. Primero fue desecado al aire y posteriormente molido utilizando un molino de martillos acoplado al tractor, seguido por el triturador de martillos y el molino de corte con 1 cm de diámetro. Por último, se utilizó el tamiz de 0,5 cm de poro para obtener la fibra final.

En las Tablas 3.5 y 3.6 se muestran respectivamente las propiedades físico-químicas y químicas, así como las físicas, de las fibras vegetales utilizadas en los Experimentos 1 y 2.

Tabla 3.5. Características físico-químicas y químicas de las fibras vegetales utilizadas.

Parámetros	Fibra coco 1	Fibra coco 2	Hoja palmera	Tronco palmera
pH (1:5) (v:v)	6,3	6,7	6,3	7,3
CE (1:5) (v:v) (dS/m)	0,37	0,33	1,21	2,61
Materia orgánica total (%)	91,9	93,3	91,9	85,2
Carbono orgánico total (%)	37,4	43,4	43,9	32,4
Nitrógeno total (%)	0,73	0,76	1,34	1,27
Relación C/N	51,2	57,1	32,8	25,5
Potasio hidrosoluble (mg/L)	281	357	1347	2694
Sodio hidrosoluble (mg/L)	238	268	397	818
Nitratos (mg/L)	< 5	5,2	4,6	201
Cloruros (mg/L)	171	199	1057	2387
Sulfatos (mg/L)	109	60,4	236	1074

CE: conductividad eléctrica.

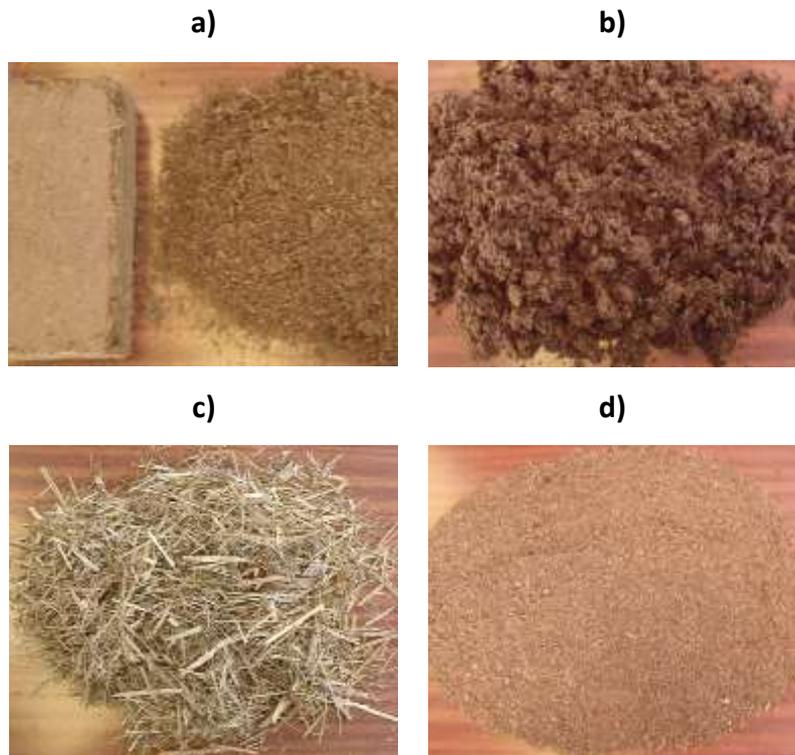


Figura 3.3. Detalle de los materiales utilizados. a) Fibra de coco; b) Sustrato comercial; c) Hoja de palmera; d) Tronco de palmera.

Tabla 3.6. Características físicas de las fibras vegetales utilizadas.

Propiedades	Fibra coco 1	Fibra coco 2	Hoja palmera	Tronco palmera	Intervalo óptimo ¹
Densidad real (g/cm ³)	1,511	1,495	1,505	1,554	--
Densidad aparente (g/cm ³)	0,065	0,072	0,057	0,195	≤ 0,2
Espacio poroso total (%)	95,9	95,2	96,2	87,5	> 85
CRA (mL agua/L sustrato)	395	723	140	393	≥ 500
CRA (g agua/g sustrato)	608	520	247	202	--
Capacidad de aireación (%)	56,4	43,2	82,3	48,2	20-30
Contracción (%)	18,0	14,3	7,30	7,70	< 30

3.3. Material vegetal

3.3.1. Lechuga

En ambos experimentos se ha utilizado la lechuga (*Lactuca sativa* L.) como cultivo para validar los sustratos elaborados, debido a la importancia de este cultivo en España. La producción total de lechugas en España es de 876.926 t, y ocupa una superficie de 33.196 ha. La comunidad autónoma con mayor superficie agrícola dedicada al cultivo de lechugas es la Región de Murcia, con un total de 14.065 ha. Así mismo, la comunidad autónoma con mayor producción de lechugas también es la Región de Murcia, con un total de 344.593 t. En la Tabla 3.7 se muestra la superficie, rendimiento y producción de este cultivo en España. Las variedades de lechugas utilizadas provenían de la casa de semillas "Gautier" y son de tipo "baby leaf". Los nombres comerciales de las dos variedades son "Derbi", usada en el Experimento 1, y "Senna", utilizada para el Experimento 2. A continuación, se describirán las dos variedades utilizadas.

- Lechuga Derbi

Es una variedad de color verde intenso medio oscuro muy brillante y de buen volumen. El cogollo bien formado tiene un color amarillo intenso en el interior. Tiene un buen comportamiento en condiciones de mucho calor, además, es tolerante al espigado y al tipburn. Tiene resistencia genética alta contra un tipo de mildiu denominado Bremia

(*Bremia Lactucae* (Bl:16-26,28)), así como resistencia intermedia contra el mosaico de la lechuga, *Lettuce mosaic virus* (LMV:1).

Tabla 3.7. Superficie, rendimiento y producción del cultivo de lechuga en España en 2014 (MAGRAMA, 2014).

Provincias y Comunidades Autónomas	Superficie (hectáreas)			Rendimiento (kg/ha)			Producción (toneladas)	
	Secano	Regadío		Total	Secano	Regadío		
		Aire libre	Protegido			Aire libre		Protegido
A Coruña	–	105	123	228	–	43.768	29.064	8.171
Lugo	–	63	73	136	–	23.500	25.000	3.306
Ourense	–	64	80	144	–	21.000	27.000	3.504
Pontevedra	–	176	44	220	–	24.711	22.825	5.353
GALICIA	–	408	320	728	–	28.846	26.763	20.334
P. DE ASTURIAS	50	45	30	125	15.000	25.000	40.000	3.075
CANTABRIA	8	–	–	8	20.000	–	–	160
Alava	–	58	35	93	–	23.570	34.500	2.575
Guipúzcoa	46	35	44	125	14.700	21.600	39.900	3.188
Vizcaya	67	86	32	185	16.600	21.600	40.500	4.266
PAÍS VASCO	113	179	111	403	15.827	22.238	38.370	10.229
NAVARRA	–	275	250	525	–	23.800	27.446	13.406
LA RIOJA	–	90	31	121	–	24.500	34.000	3.259
Huesca	–	–	–	–	–	–	–	–
Teruel	–	–	–	–	–	–	–	–
Zaragoza	–	45	5	50	–	32.500	72.000	1.823
ARAGÓN	–	45	5	50	–	32.500	72.000	1.823
Barcelona	4	280	18	302	11.276	22.885	34.857	7.080
Girona	–	231	3	234	–	26.504	28.333	6.207
Lleida	–	124	–	124	–	27.046	–	3.354
Tarragona	–	321	–	321	–	26.024	–	8.354
CATALUÑA	4	956	21	981	11.276	25.353	33.925	24.995
BALEARES	–	270	–	270	–	30.000	–	8.100
Ávila	–	20	4	24	–	25.650	39.750	672
Burgos	–	70	5	75	–	30.000	30.000	2.250
León	–	19	7	26	–	27.421	50.000	871
Palencia	–	6	1	7	–	50.000	84.500	385
Salamanca	–	26	6	32	–	28.000	28.000	896
Segovia	–	163	–	163	–	40.000	–	6.520
Soria	–	160	–	160	–	33.000	–	5.280
Valladolid	–	152	8	160	–	34.473	45.000	5.600
Zamora	–	7	8	15	–	35.000	50.000	645
CASTILLA Y LEÓN	–	623	39	662	–	34.425	42.859	23.119
MADRID	–	24	–	24	–	20.000	–	480
Albacete	–	1.050	–	1.050	–	47.500	–	49.875
Ciudad Real	–	–	–	–	–	–	–	–
Cuenca	–	30	–	30	–	14.000	–	420
Guadalajara	–	–	–	–	–	–	–	–
Toledo	–	227	–	227	–	28.500	–	6.470
CASTILLA-LA MAN	–	1.307	–	1.307	–	43.431	–	56.765
Alicante	–	730	121	851	–	30.849	31.000	26.271
Castellón	–	701	2	703	–	15.953	25.000	11.233
Valencia	–	430	–	430	–	24.302	–	10.450
C. VALENCIANA	–	1.861	123	1.984	–	23.725	30.902	47.954
R. DE MURCIA	–	14.065	–	14.065	–	24.500	–	344.593
Badajoz	–	28	–	28	–	26.400	–	739
Cáceres	–	26	–	26	–	26.700	–	694
EXTREMADURA	–	54	–	54	–	26.544	–	1.433
Almería	–	7.012	–	7.012	–	22.635	–	158.718
Cádiz	–	138	–	138	–	40.500	–	5.589
Córdoba	2	297	–	299	10.000	25.000	–	7.446
Granada	–	3.202	–	3.202	–	35.322	–	113.101
Huelva	8	97	–	105	7.000	22.720	–	2.260
Jaén	2	71	–	73	19.900	25.150	–	1.825
Málaga	–	406	–	406	–	30.500	–	12.383
Sevilla	1	179	–	180	5.425	26.163	–	4.689
ANDALUCÍA	13	11.402	–	11.415	9.325	26.828	–	306.011
Las Palmas	11	205	5	221	10.000	33.990	50.000	7.328
S.C. de Tenerife	–	252	1	253	–	16.000	30.000	4.062
CANARIAS	11	457	6	474	10.000	24.070	46.667	11.390
ESPAÑA	199	32.061	936	33.196	14.948	26.362	30.730	876.926

- Lechuga Senna

Esta variedad es de color verde medio, muy brillante. Es versátil, debido a que tiene buen comportamiento a bajas y altas temperaturas. Es tolerante al espigado, y tiene un cogollo bien formado y muy bien cerrado, apto para corazón. Presenta resistencia genética alta a alta contra el mildiu *Bremia*, *Bremia Lactucae* (Bl:16-26,28). Además tiene resistencia intermedia contra el mosaico de la lechuga, *Lettuce mosaic virus* (LMV:1).

3.3.1.1. Descripción botánica, taxonómica y fisiológica

Planta anual perteneciente a la familia *Compositae*, cuyo nombre científico es el de *Lactuca sativa* L. Posee un sistema radicular profundo poco ramificado. Sus hojas se disponen primeramente en roseta y después se aprietan unas a junto a otras, formando un cogollo más o menos consistente y apretado en unas variedades que en otras. Sus hojas pueden ser de forma redondeada, lanceolada o casi espatulada. La consistencia de las mismas puede ser correosa o blanduzca. El borde de los limbos foliares puede ser liso, ondulado o aserrado. En estados vegetativos avanzados, el cogollo o, en su caso, el manojito central de hojas, se abre para dar paso a un tallo cilíndrico y ramificado portador de hojas, así como de capítulos florales amarillentos en racimos o corimbos. Planta autógena cuyas “semillas”, que en realidad son frutos en forma de aquenios típicos, están provistas de un vilano plumoso.

3.3.1.2. Exigencias climáticas y edáficas

Aunque existe un gran número de variedades que se adaptan a una gama amplísima de climas, en términos generales puede decirse que prefieren climas templados y húmedos. La temperatura óptima de germinación de la lechuga es de 15-20°C, según cultivares. En término medio, la temperatura óptima de crecimiento de las lechugas oscila entre los 15 y 20°C. La temperatura juega un papel importante en el acogollado y en la floración de la lechuga. El excesivo calor puede producir la “subida de flor prematura” y un marcado sabor amargo en las hojas. Aunque en términos generales la lechuga es sensible a la helada, algunas variedades de invierno pueden resistir varios

grados bajo cero. La respuesta al fotoperiodismo es distinta según variedades, aunque en general, estas variedades o florecen con días neutros o con días largos.

Aunque vegeta bien en suelos diversos, le convienen sobre todo los terrenos francos y frescos que no retengan la humedad excesivamente, con abundante contenido en materia orgánica. Resiste bien los contenidos medios en salinidad, aunque en invernaderos el desarrollo del cultivo puede verse afectado por el incremento en sales solubles, producido por una fertilización excesivamente intensa, la resistencia a la salinidad es muy variable según el cultivar. Su límite óptimo de pH se cifra en 6,8 y 7,4. No resiste la acidez y se adapta bien a los terrenos ligeramente alcalinos. La acción de los vientos cálidos es muy desfavorable para el desarrollo de la lechuga.

3.3.1.3. Plagas y enfermedades criptogámicas de mayor incidencia

Accidentes y fisiopatías:

- Aborto o subida de flor prematura
- Tipburn

Plagas:

- Larvas de lepidópteros comedores de hojas
- Gusanos grises (*Agrostis* sp.)
- Mosca blanca de los invernaderos
- Pulgones
- Gusanos del alambre
- Dípteros minadores de hojas
- Tisanópteros
- Otros artrópodos
- Caracoles y babosas

Enfermedades criptogámicas de mayor incidencia:

- Mildiu de lechuga (*Bremia lactucae* Regel)
- *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib) De By.
- *Phythium ultimum* Trow.
- *Rhizoctonia solani* Kühn

- Botrytis cinerea Pers
- Oidio (Erysiphe cichoracearum D.C)

3.3.1.4. Virosis

- Virus del mosaico de la lechuga (LMV) • Virosis del mosaico del pepino (CMV)
- Virus de las nerviaduras gruesas de la lechuga (Big Bein) • Virus del bronceado del tomate (TSWV)
- Virus del falso amarilleo de la remolacha (BSYV) • Virus del amarilleamiento occidental de la remolacha (BWYV)

3.3.2.Brócoli

El otro cultivo hortícola utilizado en este estudio fue el brócoli (*Brassica oleracea L. var. itálica*), cuya producción es también muy destacable en España. Es una variedad de ciclo medio, muy tolerante a altas temperaturas en primavera y principios de otoño. Planta muy vigorosa de pellas abovedadas, compactas, de atractivo color verde intenso. Grano fino, de formación lenta y uniforme, que soporta bien la sobremaduración. Es sensible a inducir plantas ciegas en condiciones adversas. Muy resistente a altas temperaturas, siendo bajo estas condiciones cuando manifiesta sus mejores cualidades.

En España se dedican unas 22.886 ha para el cultivo del brócoli, y se obtiene una producción total de 360.555 t. La Región de Murcia tiene la mayor superficie dedicada al cultivo de brócoli con unas 10.781 ha, y también la mayor producción con unas 172.496 t. En la Tabla 3.8 se muestra la superficie dedicada a este cultivo, así como su rendimiento y producción en España. La variedad de brócoli que se utilizó se denomina “Naxos F1”, y es de la casa comercial de semillas “Sakata”.

Tabla 3.8. Superficie, rendimiento y producción del cultivo de brócoli en España
(MAGRAMA, 2014).

Provincias y Comunidades Autónomas	Superficie (hectáreas)				Rendimiento (kg/ha)			Producción (toneladas)
	Secano	Regadío		Total	Secano	Regadío		
		Aire libre	Protegido			Aire libre	Protegido	
P. DE ASTURIAS	2	-	-	2	15.000	-	-	30
CANTABRIA	-	-	-	-	-	-	-	-
NAVARRA	-	4.187	-	4.187	-	11.614	-	48.627
LA RIOJA	-	192	-	192	-	13.000	-	2.496
Huesca	-	-	-	-	-	-	-	-
Teruel	-	-	-	-	-	-	-	-
Zaragoza	-	333	-	333	-	35.035	-	11.667
ARAGÓN	-	333	-	333	-	35.035	-	11.667
Barcelona	-	44	-	44	-	12.818	-	564
Girona	-	8	-	8	-	23.000	-	184
Lleida	-	8	-	8	-	21.625	-	173
Tarragona	-	42	-	42	-	21.000	-	882
CATALUÑA	-	102	-	102	-	17.676	-	1.803
BALEARES	-	22	-	22	-	20.200	-	444
Ávila	-	-	-	-	-	-	-	-
Burgos	-	10	-	10	-	15.000	-	150
León	-	35	-	35	-	15.000	-	525
Palencia	-	-	-	-	-	-	-	-
Salamanca	-	-	-	-	-	-	-	-
Segovia	-	-	-	-	-	-	-	-
Soria	-	3	-	3	-	15.000	-	45
Valladolid	-	-	-	-	-	-	-	-
Zamora	-	-	-	-	-	-	-	-
CASTILLA Y LEÓN	-	48	-	48	-	15.000	-	720
MADRID	-	-	1	1	-	-	15.000	15
Albacete	-	2.250	-	2.250	-	12.000	-	27.000
Ciudad Real	-	3	-	3	-	10.667	-	32
Cuenca	-	-	-	-	-	-	-	-
Guadalajara	-	-	-	-	-	-	-	-
Toledo	-	21	-	21	-	14.000	-	294
CASTILLA-LA MANCHA	-	2.274	-	2.274	-	12.017	-	27.326
Alicante	-	1.917	-	1.917	-	16.000	-	30.672
Castellón	-	50	-	50	-	26.000	-	1.300
Valencia	-	-	-	-	-	-	-	-
C. VALENCIANA	-	1.967	-	1.967	-	16.254	-	31.972
R. DE MURCIA	-	10.781	-	10.781	-	16.000	-	172.496
Badajoz	-	1.292	-	1.292	-	13.075	-	16.893
Cáceres	-	-	-	-	-	-	-	-
EXTREMADURA	-	1.292	-	1.292	-	13.075	-	16.893
Almería	-	450	-	450	-	27.107	-	12.198
Cádiz	-	625	-	625	-	38.960	-	24.350
Córdoba	-	-	-	-	-	-	-	-
Granada	-	523	-	523	-	16.320	-	8.535
Huelva	-	12	-	12	-	14.750	-	177
Jaén	-	-	-	-	-	-	-	-
Málaga	-	-	-	-	-	-	-	-
Sevilla	-	75	-	75	-	10.750	-	806
ANDALUCÍA	-	1.685	-	1.685	-	27.339	-	46.066
ESPAÑA	2	22.883	1	22.886	15.000	15.755	15.000	360.555

3.3.2.1. Descripción botánica, taxonómica y fisiológica

Pertenece a la Familia botánica: *Cruciferae*, siendo el nombre científico *Brassica oleracea* L. var. *italica*. Posee una raíz pivotante de la que parte una cabellera ramificada y superficial de raíces. Las hojas son de color verde oscuro, rizadas, festoneadas, con ligerísimas espículas, presentando un limbo hendido, que en la base de la hoja puede dejar a ambos lados del nervio central pequeños fragmentos de limbo foliar a modo de peciolo. Las hojas son pecioladas aunque erectas, se extienden de forma horizontal. Su tallo principal termina en una masa globulosa de botones florales aunque también pueden formarse brotes de inflorescencias de menor tamaño lateralmente y en las axilas de las hojas, que aparecen de forma paulatina y escalonada tras el corte del cogollo terminal. Las masas de inflorescencias son de color verdoso, grisáceo o morado, el grado de compactación es pequeño y las unidades elementales (botones florales) de los manojos son morfológica y fisiológicamente estadios preflorales más avanzados que los de otras variedades.

3.3.2.2. Exigencias climáticas y edáficas

Es un cultivo que se desarrolla fundamentalmente en otoño e invierno. Para el desarrollo normal de la planta es necesario que las temperaturas durante la fase de crecimiento oscilen entre 20°C y 24°C; para poder iniciar la fase de inducción floral necesita temperaturas entre 10°C y 15°C durante varias horas al día. La humedad relativa óptima oscila entre 60 y 75%. En lo que concierne a suelos el brócoli prefiere suelos ácidos hasta un pH 5,5; aunque también se adapta a pH de orden de 7,5-7,8. La textura del suelo es preferible que sea ligera, con un buen poder de retención de la humedad. Es una planta medianamente resistente a la salinidad del suelo.

Es una planta exigente en agua, sobre todo desde mediados a finales del ciclo productivo, en que el Kc suele situarse entre 0,8-1,1.

Los ciclos productivos en el área mediterránea española suelen estar dirigidos a la exportación, con siembras al aire libre desde principios del verano a mediados del otoño, para producir en el otoño-invierno; siembras de mediados del otoño-mediados

del invierno, con semilleros protegidos y transplantes al aire libre (a veces acolchados), para producciones de primavera-principios del verano.

3.3.2.3. Plagas y enfermedades criptogámicas de mayor incidencia

Plagas de mayor incidencia

- Orugas y mariposas (*Pieris* y *Mamestra*).
- Polilla (*Plutella xylostella* y *Hellula undalis*).
- Otros noctuidos, como gusanos grises (*Agrotis* sp.), rosquilla negra (*Spodoptera* sp.).
- “Falsa potra” coleóptero curculiónido (*Ceutorhynchus pleurostigma*).
- Gusano del alambre, coleópteros del género *Agriotes*.
- Dípteros minadores o “submarinos” (*Liriomyza* sp., *Agromyza* sp.).
- Mosca (*Delia* ó *Phorbia* ó *Ilemia* ó *Chortophila*, especie brassicae).
- Pulgones (*Brevicoryne brassicae*).
- Moscas blancas de los invernaderos (*Trialeurodes vaporarum*, *Aleurodes proletella*, *A. brassicae*).
- Tisanópteros, sobre todo *Frankliniella occidentalis*.
- Ácaros. Araña roja (*Tetranychus* sp.) y acariosis de las solanáceas (*Vasates lycopersici*).
- Chinche verde (*Nezara viridula*).
- Chinchas de la col (*Erydema ornatum* y *E. oleraceum*).
- Tijeretas, dermáptero (*Forficula auricularia*).
- Nemátodos.
- Pulguilla de las crucíferas, coleóptero (*Phyllotreta memorum*).
- Cecidomia de la coliflor, mosca (*Contarinia nasturtii*).
- Caracoles y babosas.
- Aves (gorriones y estorninos), conejos y roedores.

Enfermedades criptogámicas de mayor incidencia

- Traqueomicosis diversas (*Fusarium*, *Rhizoctonia solani*, *Phoma lingam*).
- Mildiu del brócoli (*Peronospora parasitica*).

- Alternaria del brócoli (*Alternaria brassicae*, *A. brassicicola*). Manchas marrones u oscuras en las hojas.
- Cladosporiosis del brócoli (*Cladosporium* sp). Manchas oscuras superficiales en la pella.
- Sclerotinia sp.
- “Hernia de las crucíferas” (*Plasmodiophora brassicae*).
- *Botrytis cinerea*.

3.3.2.4. Virosis y enfermedades bacterianas

Bacterias: *Xanthomonas campestris* (manchitas en las hojas), *Pseudomonas*, *Erwinias*, *Rhodococcus*, etc.

Virosis: Virus del mosaico de la coliflor –CaMV-; Virus del amarilleo necrótico del brócoli –BNYV- y virus del bronceado del tomate –TSWV-.

3.4. Diseño y desarrollo experimental

El ensayo sobre sustratos sin turba para un semillero comercial, se desarrolló en dos etapas o experimentos, que se realizaron en períodos y con cultivos diferentes. Además, los componentes y las mezclas no fueron las mismas. A continuación se detalla cada desarrollo y diseño experimental para cada caso.

3.4.1. Diseño y desarrollo experimental

3.4.1.1. Experimento 1

En el diseño del Experimento 1 se realizaron mezclas ternarias utilizando como materiales de partida la fibra de coco, el vermicompost y el compost vegetal CIG-09 en diferentes proporciones respecto al volumen (v/v). Estos sustratos preparados se utilizaron para el desarrollo de plántulas de los cultivos de lechuga, variedad Derbi, y de brócoli, variedad “Naxos”, hasta alcanzar el tamaño comercial.

a) Preparación de las mezclas

Para la preparación de las mezclas, inicialmente se formularon 3 mezclas ternarias, compuestas por vermicompost, compost vegetal y fibra de coco. Para realizar cada sustrato se combinaron estos materiales en diferentes proporciones con respecto a porcentaje en volumen, las cuales muestran en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Porcentajes (v/v) de los componentes usados en las mezclas ensayadas.

Vermicompost (%)	Compost (%)	Fibra Coco (%)
20	60	20
10	60	30
20	50	30

Para llevar a cabo estas mezclas, previamente se homogeneizaron los componentes de los sustratos experimentales. Se obtuvieron unos 50 litros de cada mezcla, de los cuales se utilizaron unos 30 litros de cada mezcla para el relleno de las bandejas y los otros 20 litros restantes para la realización de la caracterización de cada sustrato. Una vez preparados los medios de cultivo, para cada tratamiento se rellenaron bandejas de poliestireno expandido de 260 alvéolos, con una capacidad de aprox. 14,5 ml por cada alvéolo, de forma que se dispusieron 3 repeticiones (bandejas) por tratamiento y cultivo. A su vez, también se dispusieron 3 repeticiones del tratamiento testigo, el sustrato ecológico comercial Floradur Bio-sustrate®, también para cada cultivo, para comparar el efecto de las mezclas elaboradas. En la Fig. 3.4 se muestra el diseño experimental llevado a cabo. Una vez rellenas las bandejas, fueron colocadas de forma aleatoria en el invernadero comercial, para obtener mayor representatividad. Durante el proceso de germinación y crecimiento de las plántulas se llevó a cabo un completo seguimiento con medida de la germinación y de la altura de planta. Una vez alcanzado el tamaño comercial, las plántulas se muestrearon y procesaron en el laboratorio.

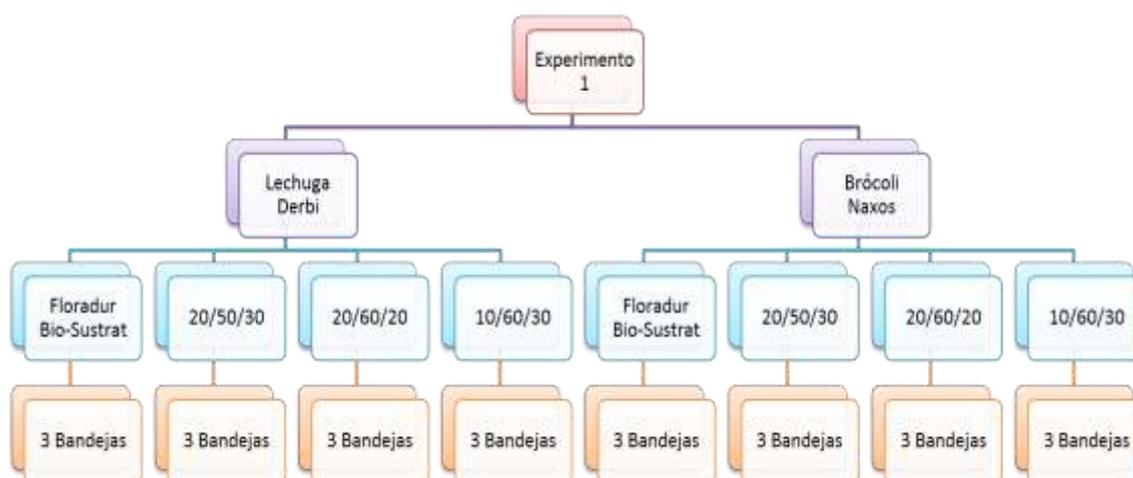


Figura 3.4. Diseño experimental del Experimento 1.

b) Cronología del experimento y seguimiento en el invernadero

Las diferentes acciones de seguimiento realizadas en el invernadero durante el Experimento 1 se muestran en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Acciones realizadas durante el Experimento 1.

Cronología Experimento 1	
Acciones	Fechas
Siembra	26/05/2015
Salida Cámara	28/05/2015
1er Índice Germinación	01/06/2015
2º Índice Germinación	05/06/2015
1er Medida Altura	10/06/2015
2º Medida Altura	15/06/2015
3er Medida Altura	22/06/2015
4º Medida Altura	01/07/2015
Muestreo Plántulas	02/07/2015

Una vez rellenas las bandejas de forma manual, la empresa realizó la siembra con su sembradora automática, tras lo cual se dejaron germinar en la cámara de germinación a una temperatura de 18 °C y una humedad relativa del 85%, proceso que tuvo una duración de 3 días. Una vez germinadas las plántulas, se realizó el seguimiento en el invernadero, llevando a cabo dos medidas de la germinación. También se realizaron

medidas de altura de plántula, con plántulas elegidas aleatoriamente y siendo siempre las mismas en cada subzona, una vez que la mayoría de las plántulas tuvieron una medida de 0,5 cm de su tallo., en este caso realizando 4 medidas, tal como se muestra en la Tabla 3.10. Este ensayo finalizó con la recogida de las plántulas cuando alcanzaron el tamaño comercial. La Figura 3.5 muestra las temperaturas que hubo durante el período de la realización del experimento.

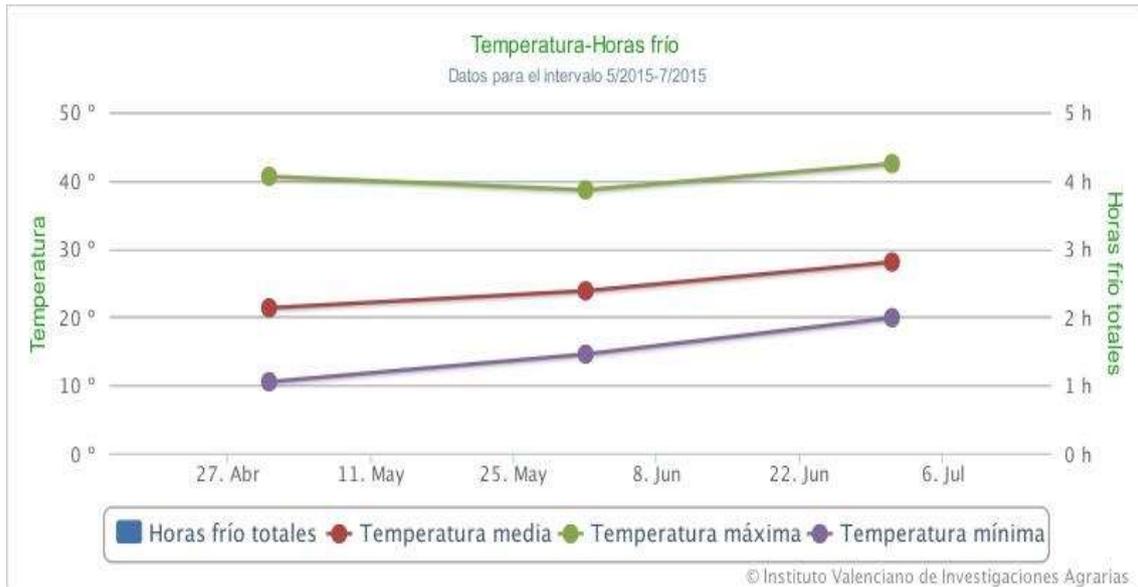


Figura 3.5. Temperaturas durante el desarrollo del Experimento 1. Fuente: Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias.

c) Recogida y procesado de las plántulas

La recogida de las plántulas y la preparación de las muestras se realizaron el día 02/07/2015. Tras realizar el muestreo de las plantas, se procedió al procesado de las mismas en el laboratorio. Para poder determinar la incidencia de los tratamientos planteados sobre la morfología, producción de biomasa y elongación vegetal, se cuantificó el peso fresco y el peso seco de las plantas y se determinó la morfología, peso fresco y peso seco de las raíces. Antes de comenzar, se analizó la calidad visual de las raíces.

Para obtener las muestras, se optó por dividir en 2 sub-zonas cada mitad de bandeja, por lo tanto, para cada tratamiento y cultivo habría 12 sub-zonas, debido a que cada tratamiento tiene 3 bandejas para cada cultivo. De cada sub-zona, se muestrearon al azar 10 plántulas cortadas para realizar la pesada en fresco. Posteriormente, el material fresco se introdujo en la estufa de desecación a 60 °C durante 3 días. Una vez desecadas las muestras, se realizó el peso seco de las partes aéreas.

Por otra parte, también se realizó el análisis de las raíces de ambos cultivos. Para ello se realizó el peso fresco y seco de la raíz. Se subdividió cada bandeja en dos mitades, teniendo 6 zonas por tratamiento y cultivo. De cada zona se procesó una muestra de 5 raíces, por lo tanto se obtuvieron 6 paquetes de 5 raíces para cada tratamiento y cultivo. Las raíces fueron lavadas antes de la pesada, y tuvieron un último enjuague con agua destilada.

También se realizó un análisis visual sobre la calidad de las raíces que se obtuvieron con los tratamientos y los cultivos ensayados. Para realizar este análisis, se recogieron 4 raíces por cada mitad de bandeja, correspondientes a cada tratamiento y cultivo. Como referencia utilizaron 8 raíces elegidas al azar del sustrato comercial utilizado como testigo en estos ensayos. La calidad de la raíz se estableció de acuerdo a los siguientes criterios:

- Densidad de raíz visible en la superficie de los sustratos (1-baja; 5-alta)
- Tipo de raíz (1- delgada y débil; 5-gruesa y fuerte)
- Color de raíz (1-oscura; 5-blanca).

3.4.1.2. Experimento 2

En el diseño y desarrollo del experimento 2, se realizaron sustratos binarios de utilizando diferentes componentes, en este caso se usó la fibra de coco como componente fijo en todas las mezclas, combinada con los compost CIG-03, CIG-04 y las fibras vegetales (hoja de palmera y tronco de palmera), respectivamente. Este ensayo se realizó con un único cultivo, siendo de la lechuga tipo “baby leaf”, variedad “Senna”.

a) Preparación de las mezclas

Las mezclas binarias que se prepararon en este Experimento se realizaron con un componente base, la fibra de coco, mezclada con diferentes proporciones de los compost y los materiales fibrosos antes mencionados. Las mezclas se prepararon variando la proporción de la fibra de coco, y la de los demás componentes, de forma que se obtuvieron 6 sustratos para cada mezcla entre componentes, que se diferencian en las proporciones de ambos materiales. En la Tabla 3.11 se muestran las la nomenclatura utilizada para las mezclas y las proporciones en volumen de los sustratos ensayados.

Tabla 3.11. Porcentajes de cada uno de los materiales en las mezclas ensayadas.

Fibra coco (%)	Hoja palmera (%)	Fibra coco (%)	Tronco palmera (%)
0	100	0	100
20	80	20	80
40	60	40	60
60	40	60	40
80	20	80	20
100	0	100	0
Fibra coco (%)	Compost HP (%)	Fibra coco (%)	Compost TP (%)
0	100	0	100
20	80	20	80
40	60	40	60
60	40	60	40
80	20	80	20
100	0	100	0

HP: hoja de palmera; TP: tronco de palmera.

El proceso llevado a cabo para elaborar las muestras fue similar al realizado en el Experimento 1. Se homogeneizaron los componentes utilizados, y se mezclaron en porcentaje sobre volumen de diferentes formas, tal como se mencionó anteriormente. Se obtuvieron unos 24 litros aproximadamente de cada sustrato o tratamiento, de los cuales la mayor parte fueron para el relleno de las bandejas, y aproximadamente 10

litros fueron utilizados para la caracterización físico-química, de modo que se prepararon 2 repeticiones (bandejas) por cada tratamiento. Adicionalmente se pusieron 2 bandejas del sustrato comercial utilizado como testigo del ensayo. En la Figura 3.6 se muestran las variables del diseño experimental.

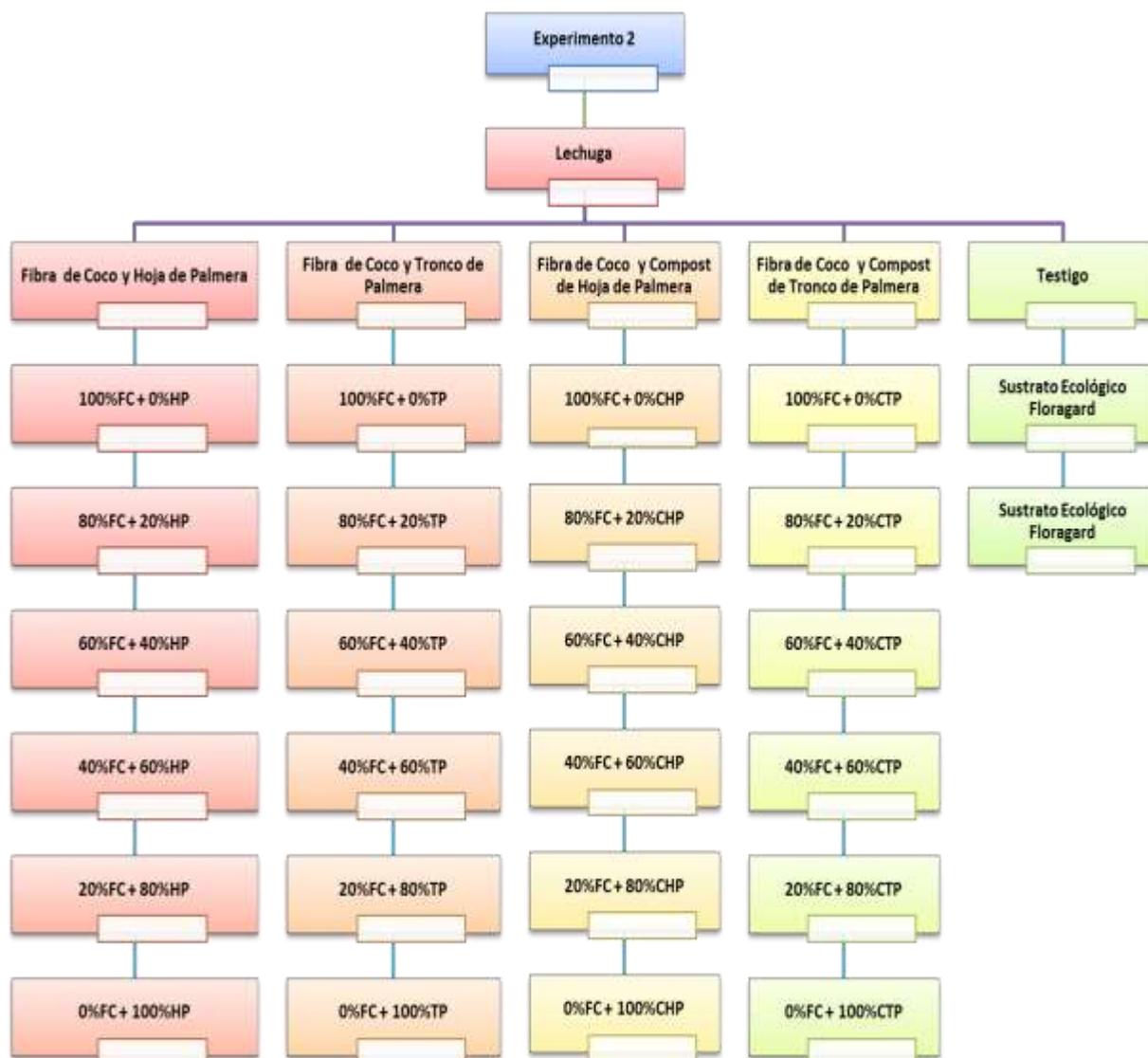


Figura 3.6. Diseño experimental del Experimento 2.

b) Cronología del experimento y seguimiento en el invernadero

Las diferentes acciones de seguimiento realizadas en el invernadero durante el Experimento 2 se muestran en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12. Acciones realizadas durante el Experimento 2.

Cronología Experimento 2	
Acción	Fecha
Siembra	13/11/2015
Salida Cámara	16/11/2015
1er Índice Germinación	24/11/2015
2º Índice Germinación	27/11/2015
3er Índice Germinación	04/12/2015
1er Medida Altura	10/12/2015
2º Medida Altura	15/12/2015
3er Medida Altura	18/12/2015
4º Medida Altura	24/12/2015
Muestreo plántulas	28/12/2015

Para iniciar este experimento, se rellenaron las bandejas con los sustratos manualmente, y posteriormente, la empresa Babyplant sembró con semillas de lechuga tipo “baby leaf” de la variedad “Senna” de la casa comercial “Gaultier”. Una vez sembradas se introdujeron en la cámara de germinación a una temperatura de 18 °C y un 85% de humedad relativa, durante 3 días.

A partir de la implantación de las bandejas aleatoriamente en el lugar de trabajo en el invernadero, semanalmente se visitó para obtener los datos germinación, y las medidas de alturas de las plantas. Para realizar el muestreo de la germinación y medida de altura se subdividieron en 4 sub-zonas cada bandeja. Las medidas de alturas se realizaron a 6 plantas por sub-zona, siendo siempre las mismas plantas en cada medida obtenida.

Las plantas alcanzaron su tamaño comercial el día 28/12/2015, día en el que se realizó el muestreo de las plántulas en el laboratorio. En la Figura 3.7 se muestran las temperaturas estimadas en el intervalo de tiempo en el que realizó el Experimento 2.

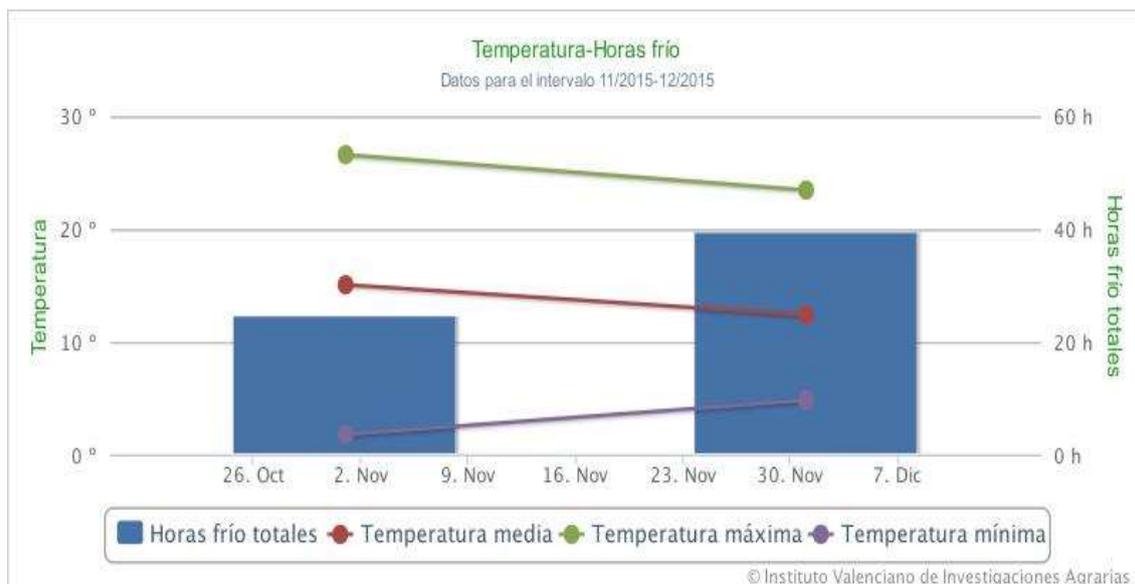


Figura 3.7. Temperaturas durante el desarrollo del Experimento 2. Fuente: Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias.

c) Recogida y procesado de las plántulas

El muestreo de las plántulas se realizó en el laboratorio, el día 28/12/2015. Para ello, se cortaron al azar 10 plántulas por sub-zona de cada bandeja, para obtener mayor representatividad de los datos obtenidos. Adicionalmente, también se recogieron aleatoriamente 5 raíces por cada sub-zona, unas 20 raíces por bandeja y tratamiento. Se procedió a realizar la pesada de los paquetes de las partes aéreas y las raíces en fresco. Después de la pesada en fresco, se introdujeron en una estufa de aire forzado a unos 60 °C durante 3 días para desecar las plántulas y proceder a la pesada de las partes aéreas y raíces, y así obtener los parámetros que planteamos para la comparación de los distintos tratamientos, tal como se describió en el Experimento 1. En este experimento también se realizó una comparación sobre la calidad visual de las raíces en el cepellón unas vez se han desarrollado las plántulas. Para obtener la calidad visual, se recogió una muestra de 5 raíces por cada sub-zona de bandeja, teniendo 4 sub-zonas por bandeja. Estas raíces se compararon con las que se obtuvieron de las bandejas rellenas con el sustrato ecológico comercial utilizado como testigo. El criterio para comparar la calidad visual de las raíces fue igual al del Experimento 1.

3.5. Métodos analíticos empleados

- **pH**

La determinación del pH se basa en la medida de la diferencia de potencial existente entre un electrodo de vidrio y el electrodo de referencia calomelanos ($\text{Hg}_2\text{Cl}_2(\text{sat})$, $\text{KCl}(\text{xF})/\text{Hg}$) sumergidos en una misma disolución. Esta diferencia de potencial es función lineal de la actividad de los iones hidrógenos presentes en la solución problema a una temperatura dada. Este parámetro es fundamental ya que influye en las reacciones químicas del suelo y de los sustratos, condicionando la disponibilidad de nutrientes. La determinación del pH de todos los sustratos y los componentes iniciales que se han utilizado, se realizó pH-metro CRISON micro pH 2001.

- **Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica es la capacidad que tiene una solución para transportar la corriente eléctrica. La conductividad depende de la actividad de los iones disueltos y de la temperatura a la que se realiza la medida. Para medir la conductividad se hace uso de un puente Wheastone y una célula de conductividad apropiada, comparando a la misma temperatura la resistencia eléctrica de la muestra y de una solución estándar de cloruro potásico.

En los sustratos, la medida de la conductividad eléctrica se realizó en el extracto acuoso 1:5 (V/V), (Norma Europea 13037:1999). Para ello, se ha de establecer la densidad aparente compactada del sustrato (Norma Europea 13040:1999). Los valores de la conductividad eléctrica de las mezclas de sustratos y los componentes iniciales se determinaron con el conductímetro CRISON 525.

- **Materia orgánica total**

La materia orgánica se determinó mediante calcinación a 430°C durante 24 horas. Se pesó con precisión de 0,1 mg entre 3-4 g de muestra seca y molida y se introdujo en un crisol de porcelana. A continuación, se realizó la calcinación a 430°C durante 24 horas hasta conseguir obtener cenizas blancas. Para calcinar las muestras y poder obtener la materia orgánica total se utilizó el horno mufla SELECTA que hay en el laboratorio.

- **Determinación del C orgánico total**

Se mide el dióxido de carbono producido por la combustión seca, al quemar la muestra a 950°C en un analizador elemental EuroVector. Se pesó en torno a 0,4 g de muestra, se encapsuló en un recipiente de estaño y se quemó en atmosfera ultrapura de O₂ a 950°C. Los productos de combustión, gases del tipo NO_x se reducen a N₂, se recolectan y son medidos mediante conductividad térmica. El C se transforma en CO₂ y se determina mediante sensor de infrarrojos.

- **Determinación del N total**

El nitrógeno total también se determinó mediante un analizador de C/N. Esta determinación se realizó pesando de 0,1 a 0,15 g de muestra, con precisión de 0,0001 g, en una cápsula de estaño y se introdujo en el analizador previamente calibrado con EDTA. El analizador utilizado para determinar el N total es el analizador elemental EuroVector.

- **Densidad real**

Se calculó siguiendo el método descrito por De Boodt et al., (1974), en el que se supone un valor fijo de densidad real para los suelos minerales de 2,65g/cm³, y de 1,45 g/cm³ para los sustratos orgánicos. La ecuación utilizada para el cálculo de la densidad real (DR) es:

$$DR (g/cm^3) = 100/(\%MO/1,45) + (\%MM/2,65)$$

Donde MO es el contenido en materia orgánica total y MM en material mineral (cenizas).

- **Densidad aparente**

La densidad aparente (DA) se determinó siguiendo el método propuesto por De Boodt y col. (1974), basado en el cálculo del peso seco del sustrato contenido en un cilindro de volumen conocido, tras haber sido sometido a una succión de 10cm de columna de agua (c.a.). Para ello se utilizaron anillas de acero inoxidable de 90 mm de Ø, 52 mm de altura y tela nylon. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado. Con los valores medios de la humedad, se estima la densidad aparente mediante la siguiente ecuación:

$$DA \text{ (g/cm}^3\text{)} = \{ (B-A)/V \} * \{ (100-X)/100 \}$$

Donde:

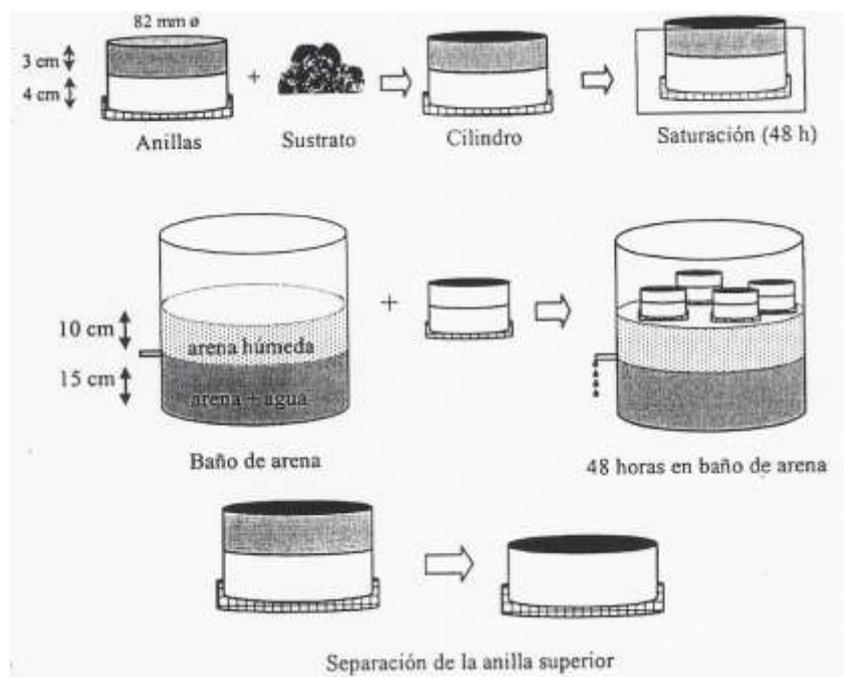
A: Peso del conjunto anilla- tela de nylon (g).

B: Peso del conjunto anilla- sustrato húmedo (g).

C: Peso del conjunto anilla- sustrato seco (g).

V: Volumen de anilla ().

X: Humedad del sustrato tras haber sido sometido a una succión de 10 cm de columna de agua. $(X \%) = (B-C)/(B-A)*100$



- **Densidad aparente compactada**

La densidad aparente compactada se determina mediante el llenado de un cilindro de ensayo de un litro con el sustrato, ajustando con un collar de extensión, tamiz fijo/controlado de flujo y embudo. Se aplica una compactación estática, excepto en el caso de materiales, muy comprimibles o elásticos y se pesa el contenido final del cilindro.

- **Espacio poroso total**

El espacio poroso total (EPT) se calcula a partir de los datos de densidad real (DR) y densidad aparente (DA), aplicando la ecuación (Martínez, 1992):

$$\text{EPT (\%)} = \{1 - (\text{DA})/(\text{DR})\} * 100$$

- **Capacidad de retención de agua**

La capacidad de retención de agua (CRA) se determina según la modificación de la metodología de De Boodt et al., (1974) propuesta por Martínez, (1992) utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{CRA (ml agua/l sustrato)} = \{(B-C)/V\} * 1000$$

Donde V es el volumen de la anilla de 4 cm utilizada para la determinación de la densidad aparente, y B y C son los pesos obtenidos para su cálculo.

- **Capacidad de aireación**

Se calcula el contenido de volumen de aire presente en la muestra, después de haber aplicado una presión hidrostática de menos de 10 cm aplicando la ecuación siguiente:

$$\text{CA (\%)} = \text{EPT} - \text{CRA}$$

Donde:

CA: volumen de aire en porcentaje de volumen % (V/V) de muestra húmeda, para una presión hidrostática de menos de 10 cm.

EPT: espacio poroso total en (%)

CRA: capacidad de retención de agua en (ml de agua/ 100 ml sustrato)

- **Contracción de volumen**

Siguiendo la propuesta de Martínez, (1992), la contracción de volumen se calcula a partir de la pérdida de volumen experimentada por el sustrato contenido en la anilla, tras secarlo a 105°C. Para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{C (\%)} = \{(V - V_{ss}) / V\} * 100$$

Donde V es el volumen de la anilla utilizada para la determinación de la densidad aparente y V_{ss} es el volumen de sustrato contenido en la anilla tras secarlo a 105°C.

Este se calcula a partir de la ecuación del volumen de un cilindro ($h\pi r^2$), donde r y h se obtienen como valor medio de las medidas del diámetro (dos) y de la altura (cuatro) realizadas en el sustrato seco contenido en la anilla.

- **Aniones solubles**

Los aniones solubles (Cl^- , SO_4^{2-} Y NO_3^-) se determinaron por cromatografía iónica en el extracto acuoso 1:5 (V/V) (Norma Europea 13037:1999), realizando diluciones en función de la electro-conductividad para no estropear el cromatógrafo utilizado. La determinación de los aniones solubles se realizó en el Servicio de Instrumentación Científica, situada en el campus de la EPSO, en la Universidad Miguel Hernández. El cromatógrafo iónico utilizado es el modelo ICS-1000 de la casa comercial Dionex.

- **Determinación de Na y K en el extracto soluble.**

Para realizar la determinación de sodio y potasio en las mezclas de sustratos y en los componentes iniciales, se utilizó el extracto acuoso 1:5 (v/v) realizado para la determinación de pH y la conductividad eléctrica. Estos extractos se diluyeron en función del intervalo óptimo de registro de datos que tiene el fotómetro de llama PFP 7 Jenway utilizado. La calibración de este fotómetro se realizó con una disolución de 10 ppm de Na y 10 ppm de K.

3.6. Métodos estadísticos

El tratamiento estadístico aplicado a los datos obtenidos ha sido diferente en cada uno de los Experimentos llevados a cabo. En el Experimento 1 se realizó mediante un análisis estadístico ANOVA para estudiar las posibles diferencias entre tratamientos para cada uno de los cultivos estudiados. La prueba Tukey-b se utilizó como prueba post-hoc para evaluar las diferencias entre las medias específicas, mostrándose en los resultados mediante el empleo de letras para una probabilidad del 95% ($P < 0,05$), para cada una de las asociaciones analizadas individualmente.

El análisis estadístico del Experimento 2 estuvo basado en el uso de diversas técnicas de métodos estadísticos de análisis multivariante de una selección de los parámetros analizados, tanto en los sustratos ensayados, como en las muestras vegetales.

Los métodos utilizados fueron el análisis por componentes principales (PCA, principal components analysis), el análisis jerárquico de clúster (HCA, hierarchical cluster analysis) y el análisis no jerárquico de clúster por el método de K-medias (non-hierarchical CA, K-means method, utilizando la metodología descrita por Rinaldi y col. (2014). Previamente a estos análisis, todas las variables fueron estandarizadas para reducir la desviación de la normalidad. El análisis PCA fue llevado a cabo utilizando la matriz completa de datos para explorar las posibles relaciones entre variables y tratamientos. Sin embargo, debido al importante número de variables utilizadas, sólo se seleccionaron los componentes del PCA con valores superiores a 4.

Posteriormente, y basándonos en los resultados obtenidos con el PCA, se llevó a cabo el análisis HCA, utilizando la distancia Euclídea y la regla de amalgamación según el método de Ward, sobre una matriz de datos formada por 17 variables (6 propiedades correspondientes al sustratos y 11 propiedades de las plántulas) para identificar similitudes entre tratamientos. Finalmente, se realizó el análisis no jerárquico de cluster con algoritmos K-means, para identificar tratamientos homogéneos, así como las variables más relevantes asociadas a cada tratamiento. El número óptimo de clusters se seleccionó usando el criterio del agrupamiento cúbico (cubic clustering criterion). Adicionalmente, se realizó el análisis no paramétrico de la varianza Kruskal–Wallis a $p < 0,05$ después de la corrección de Bonferroni para comparaciones múltiples, de forma separada para cada variable para evaluar la capacidad de discriminación entre tratamientos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. EXPERIMENTO 1

4.1.1. Características de los sustratos utilizados

a) Propiedades físico-químicas y físicas

En las siguientes figuras y tablas se muestra el efecto de los diferentes tratamientos ensayados sobre las propiedades físico-químicas y físicas de los medios de cultivos ensayados.

○ pH y conductividad eléctrica

En la figura 4.1, se representan los valores de pH de las diferentes mezclas ternarias realizadas y el del tratamiento testigo (sustrato comercial).

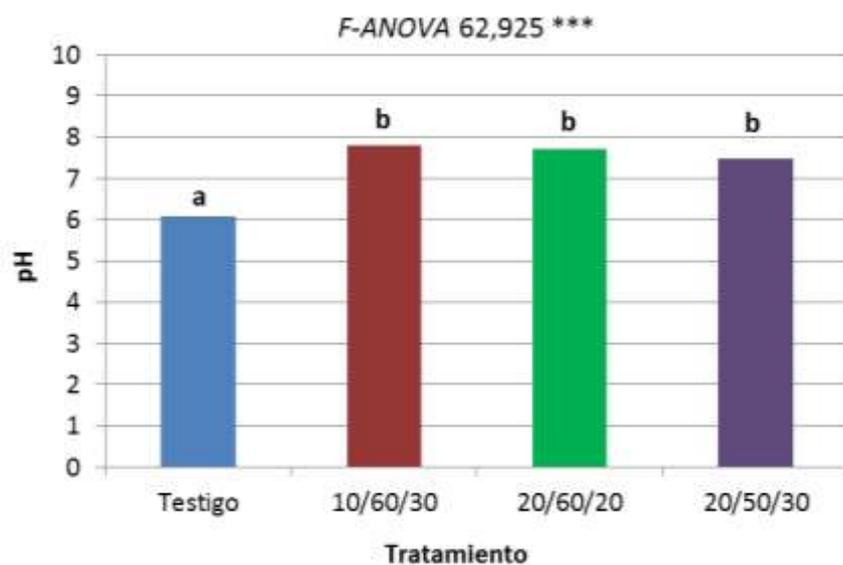


Figura 4.1. Efecto de los diferentes tratamientos sobre el pH de los sustratos estudiados. Para cada tipo de sustrato, los valores seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes ($P < 0,05$).

Se puede observar que las tres mezclas ternarias no fueron significativamente diferentes entre ellas, en cuanto al valor del pH, aunque sí hay cierta diferencia con respecto al pH del sustrato comercial utilizado como testigo. Aunque no existan diferencias significativas de pH en las tres mezclas ternarias, el valor de pH aumentó con el incremento de la proporción de compost vegetal que contienen las mezclas, hecho también observado por Bustamante y col. (2008) en un ensayo de sustitución de turba utilizando compost de origen vitivinícola.

La conductividad eléctrica de los medios de cultivo es uno de los parámetros esenciales en la nutrición de las plantas, por lo tanto, es un factor a tener en cuenta. La Figura 4.2, muestra los valores de la conductividad eléctrica del sustrato testigo utilizado y de las tres mezclas ternarias.

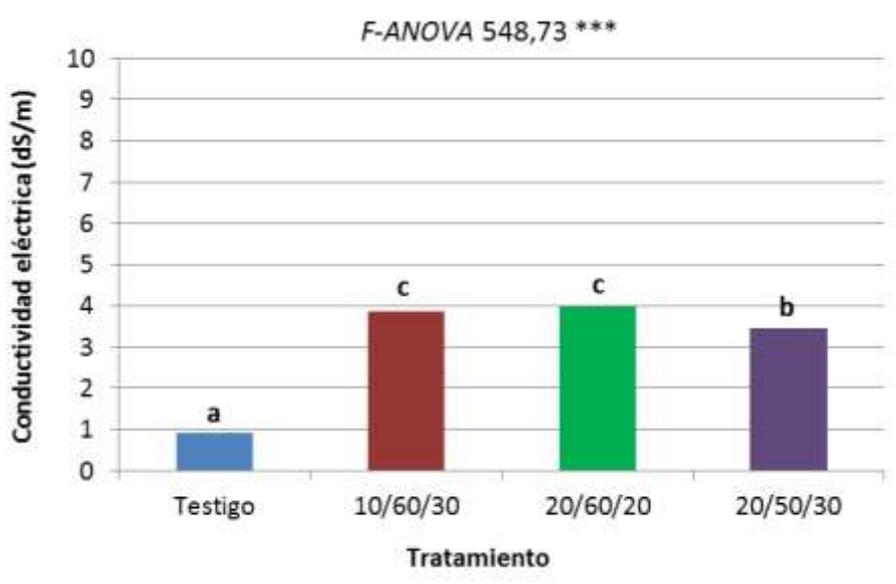


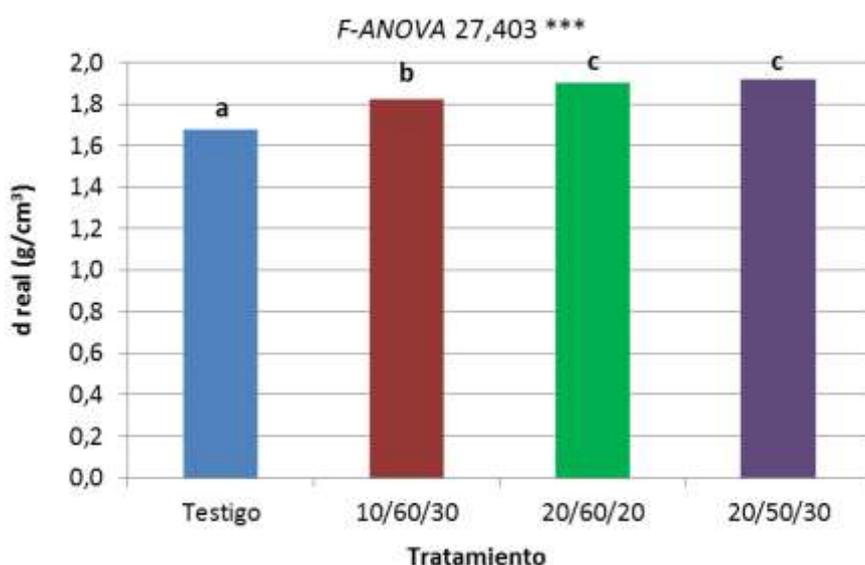
Figura 4.2. Efecto de los diferentes tratamientos sobre la conductividad eléctrica de los sustratos estudiados. Para cada tipo de sustrato, los valores seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes ($P < 0,05$).

La conductividad eléctrica del testigo fue inferior a 1 dS/m, un valor ideal para la nutrición de las plantas. Se puede observar que el incremento de la proporción del compost vegetal en las mezclas realizadas aumentó los valores de la conductividad eléctrica. Este hecho también fue observado por Bustamante et al. (2008) en un

experimento de cultivo en semillero utilizando también como sustratos mezclas de compost y turba. Además, el aumento de la dosis de fibra de coco provocó una disminución de la conductividad eléctrica. Esta alta salinidad puede estar en el núcleo de los problemas generados por estos medios en el desarrollo vegetativo de los cultivos ensayados con este compost, que se comentarán en apartados posteriores.

○ Densidad real

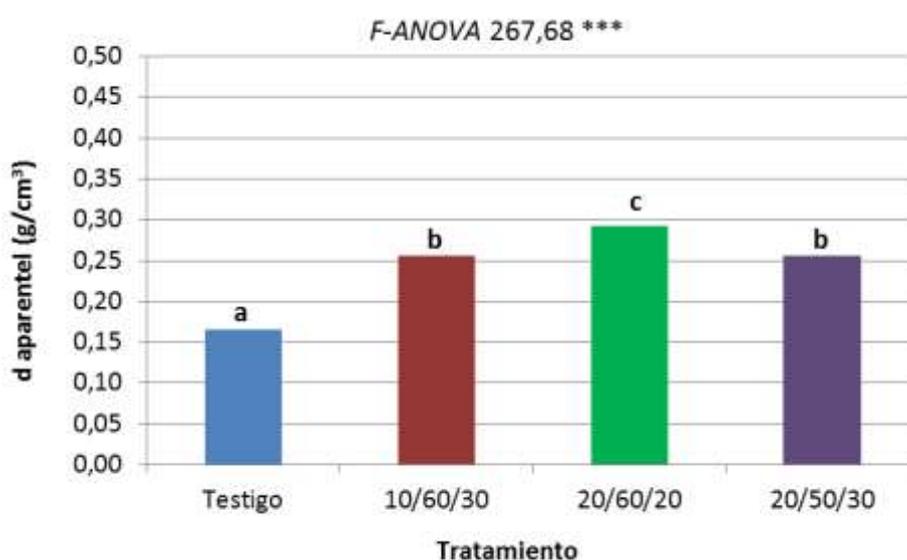
En la Figura 4.3 se muestran los valores de la densidad real que se han obtenido en las mezclas ternarias y el testigo. Se observan tres categorías estadísticas, en el testigo la densidad real fue inferior respecto a los sustratos ternarios. Las mezcla 20/60/20 y 20/50/30 fueron estadísticamente iguales y son las que mayor densidad real presentan, esto sugiere que el aumento de la proporción del vermicompost, y la disminución de la cantidad de compost vegetal, provocan el incremento de la densidad real en las mezclas. El testigo presentó una densidad real de $1,65 \text{ g/cm}^3$ y el valor máximo encontrado es de $1,9 \text{ g/cm}^3$ en las mezcla 20/50/30.



Figuras 4.3. Incidencia de los tratamientos establecidos sobre la densidad real de los sustratos ensayados. Para cada tipo de compost, letras distintas implican tratamientos estadísticamente diferentes ($P < 0,05$).

○ **Densidad aparente**

En la Figura 4.4 se representan los valores de densidad aparente analizados en las mezclas realizadas y el testigo utilizado. Este parámetro aporta información sobre la capacidad de anclaje de la planta por parte del sustrato. Los valores han oscilado entre 0,16 y 0,29 g/cm³, entre el testigo y la mezcla 20/60/20. Los valores de densidad aparente del testigo y las mezclas utilizadas se aproximan a un valor óptimo de 0,2 gr/cm³.



Figuras 4.4. Incidencia de los tratamientos establecidos sobre la densidad aparente, densidad aparente compactada y densidad real de los sustratos ensayados. Para cada tipo de compost, letras distintas implican tratamientos estadísticamente diferentes ($P < 0,05$).

○ **Espacio poroso total (EPT)**

El espacio poroso total es el volumen total de material que puede ser ocupado por fluidos, tanto aire como agua. El valor ideal para un sustrato debe ser superior al 85% del volumen del material. Entre las tres mezclas, se puede observar que hay dos mezclas, la 10/60/30 y 20/60/20 que presentaron los menores valores de espacio poroso, de aproximadamente un 82-83%. La mezcla 20/50/30 presentó un espacio

poroso total situado entre el testigo y las anteriores mezclas (Fig. 4.5). Se podría deducir, que el incremento de la proporción de fibra de coco y la disminución de cantidad de compost vegetal en las mezclas, aumentó el espacio poroso total, lo cual favorece el intercambio gaseoso en el sustrato (Ceglie y col., 2015).

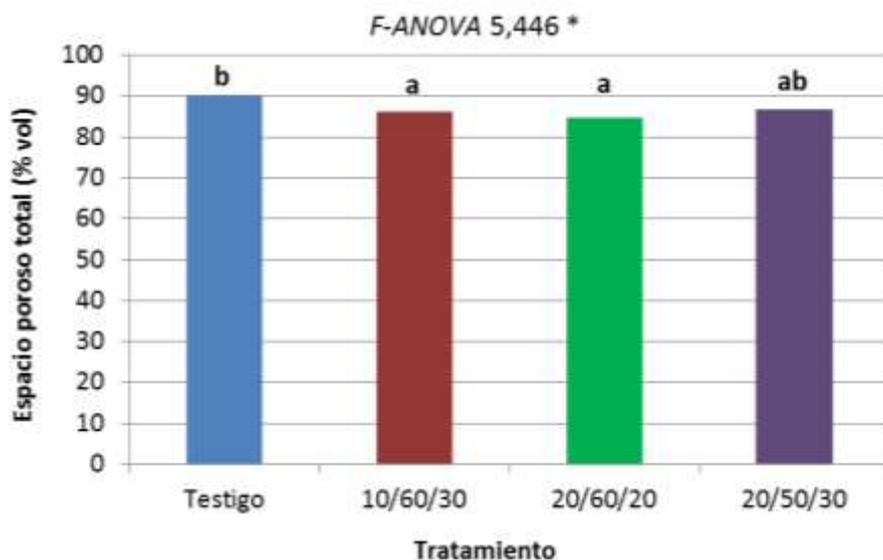


Figura 4.5. Incidencia de los tratamientos establecidos sobre el espacio poroso total de los sustratos ensayados. Para cada tipo de compost, letras distintas implican tratamientos estadísticamente diferentes ($P < 0,05$).

○ **Contracción**

En la Figura 4.6 se observan los valores de la contracción en los sustratos ensayados. La contracción nos aporta la información sobre el grado de variación del volumen del material en ciclos de humectación-deseccación y, por tanto, sobre la compactación del mismo y la compresión de las raíces, así como sobre la eficacia del riego y la fertilización. Se observa que los valores de las mezclas de sustratos no fueron significativamente diferentes entre sí, pero sí fueron diferentes al testigo utilizado.

El valor de contracción óptimo debe ser inferior al 30 % en volumen. Los valores de contracción de las mezclas fueron del orden del 15% en volumen del material, siendo

inferiores al 20% del testigo. El uso de compost vegetal, fibra de coco y vermicompost provocó una mejora de esta característica.

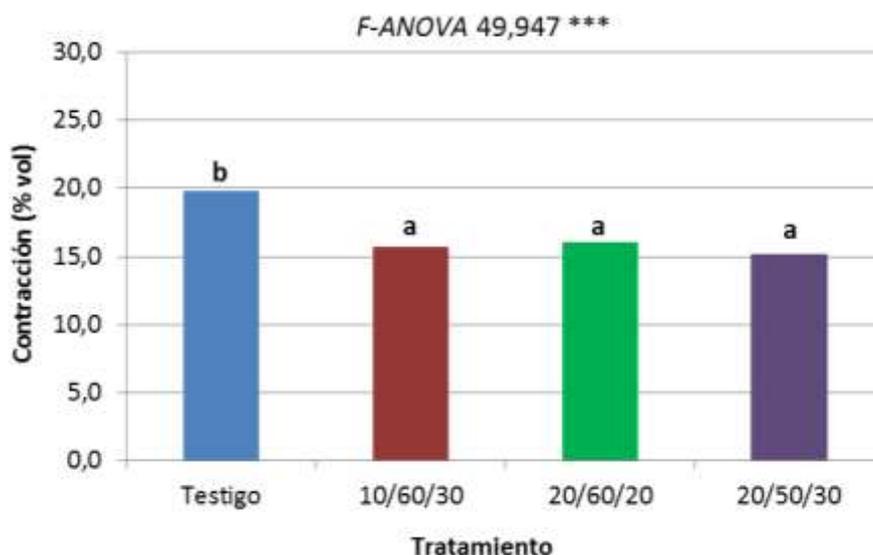


Figura 4.6. Incidencia de los tratamientos establecidos sobre la contracción en volumen de los sustratos ensayados. Para cada tipo de compost, letras distintas implican tratamientos estadísticamente diferentes ($P < 0,05$).

○ Capacidad de retención de agua

La capacidad de retención de agua se define como la cantidad máxima de agua que puede retener un material bajo unas condiciones de medida normalizadas (Norma UNE-EN 13041-1999). En la Fig. 4.7 se muestran los valores de este parámetro en cada una de las mezclas ensayadas frente al sustrato testigo.

Los valores de capacidad de retención de agua fueron óptimos, ya entraron en el rango sugerido para un sustrato ideal (≥ 500 ml agua/L sustrato). De los sustratos utilizados en este experimento, todos tuvieron un valor de capacidad de retención de agua inferior al óptimo, además, se puede observar que las mezclas 20/60/20 y 20/50/30 mostraron un mejor comportamiento que el testigo utilizado para esta característica, se podría deducir que el aumento de la proporción del vermicompost mejora esta la retención. El uso de compost vegetal y fibra de coco disminuyeron esta característica.

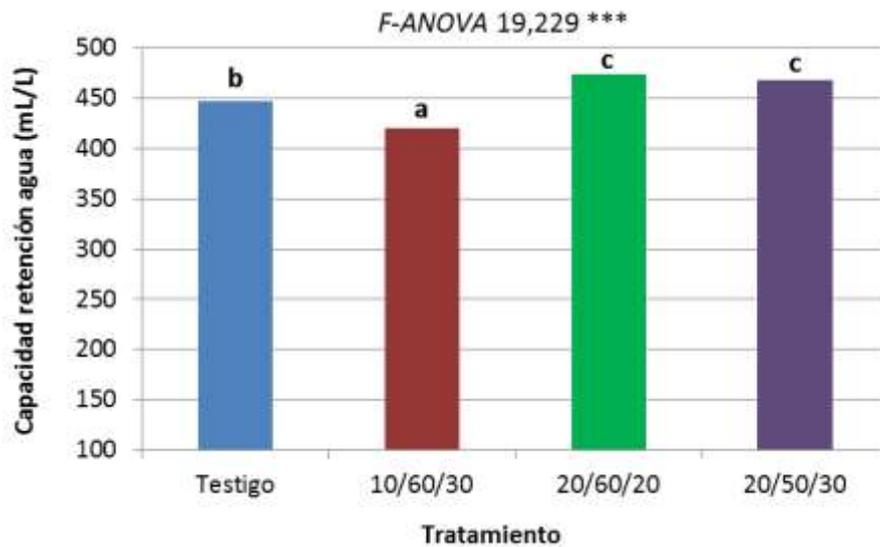


Figura 4.7. Incidencia de los tratamientos establecidos sobre la capacidad de retención de agua de los sustratos ensayados. Para cada tipo de compost, letras distintas implican tratamientos estadísticamente diferentes ($P < 0,05$).

○ Capacidad de aireación

En la Figura 4.8 se muestran los valores de la capacidad de aireación en cada uno de los medios de cultivo ensayados. La capacidad de aireación es la proporción del volumen de material que contiene aire después de saturarlo con agua y dejado drenar, usualmente a 1 kPa (10 cm de columna de agua).

Los valores óptimos de capacidad de aireación son 20-30 % en volumen y es el parámetro más restrictivo ya que los materiales con una capacidad de aireación inferior al 20 % no permitirán una correcta difusión de oxígeno hacia las raíces.

La capacidad de aireación de los sustratos utilizados es mayor que el límite establecido. Los valores oscilan entre 36 y el 44 % para la mezcla 20/60/20 y el testigo. El aumento de las proporciones de compost y fibra de coco provocaron un incremento en la capacidad de aireación de los sustratos.

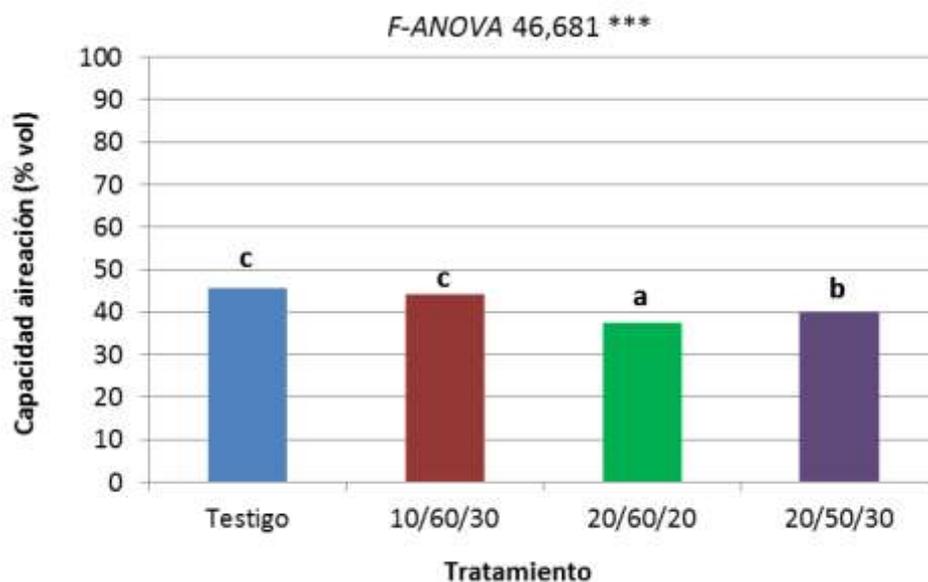


Figura 4.8. Incidencia de los tratamientos establecidos sobre la capacidad de aireación de los sustratos ensayados. Para cada tipo de compost, letras distintas implican tratamientos estadísticamente diferentes ($P < 0,05$).

b) Propiedades químicas

En las siguientes figuras y tablas se muestra el efecto de los diferentes tratamientos ensayados sobre las propiedades químicas de los medios de cultivos.

○ **Contenido en materia orgánica, cenizas, carbono orgánico total y nitrógeno total**

En la siguiente Tabla 4.1, se muestran los porcentajes de la materia orgánica total, las cenizas, el carbono orgánico total y el nitrógeno total, para los diferentes sustratos utilizados.

El sustrato que presentó el mayor porcentaje de materia orgánica total fue el testigo, sobre el 70,9%. La mezcla 10/60/30 mostró un nivel intermedio de materia orgánica total sobre los otros sustratos utilizados, del 55,2%. Las mezclas 20/60/20 y 20/50/30 presentaron porcentajes inferiores de materia orgánica, sobre un 48% y 46,8% respectivamente. El uso de compost vegetal y fibra de coco mejoró esta característica química aunque hay una diferencia significativa respecto al testigo.

En cuanto al porcentaje de cenizas, el testigo presenta el menor contenido en cenizas, del 29,3%. La mezcla 10/60/30 tiene un porcentaje del 45% y se sitúa en un valor intermedio entre los obtenidos. Las mezclas 20/60/20 y 20/50/30 obtuvieron sobre el 52,3% 53,4% de contenido en cenizas respectivamente, no presentando diferencias significativas.

Tabla 4.1. Características químicas de los diferentes sustratos ensayados.

Tipo de sustrato	Materia orgánica total (%)	Cenizas (%)	C orgánico total (%)	N total (%)
Testigo	70,9c	29,3a	34,4b	1,24a
Mezcla 10/60/30	55,2b	45,0b	31,0b	2,23d
Mezcla 20/60/20	48,0a	52,3c	25,6a	2,08c
Mezcla 20/50/30	46,8a	53,4c	25,9a	1,99b
F-ANOVA	295,6***	438,8***	13,416***	412,84***

Significación al $P < 0,001$ (***), $P < 0,01$ (**), $P < 0,05$ (*) y $P > 0,05$ (ns). En función de los diferentes sustratos, los valores en columna seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes ($P < 0,05$).

La mezcla 10/60/30 y el sustrato testigo no presentaron diferencias significativas en el porcentaje de carbono orgánico total, con porcentajes del 31% y 34,4%, respectivamente. Respecto a este parámetro, las mezclas 20/60/20 y 20/50/30 fueron estadísticamente iguales, y obtuvieron un 25,6% y 25,9%, respectivamente.

En cuanto al nitrógeno total, todos los sustratos presentaron diferencias significativas entre ellos, teniendo el mayor porcentaje la mezcla 10/60/30, con un 2,23%. El testigo utilizado fue el que menor cantidad de nitrógeno presentó, con un 1,24%. La mezcla 20/60/20 mostró un 2,08% y la 20/50/30, un 1,99%.

○ **Concentración en iones solubles**

Se han realizado mediciones de los principales iones solubles en los sustratos utilizados. En la Tabla 4.2 se puede observar las concentraciones de los diferentes iones que se han analizado para los sustratos utilizados. El testigo presentó las concentraciones más bajas para todos los iones, con una diferencia muy significativa respecto a las mezclas realizadas.

Tabla 4.2. Concentración de iones solubles de los diferentes sustratos ensayados.

Tipo de sustrato	Potasio hidrosoluble (mg/L)	Sodio hidrosoluble (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Cloruros (mg/L)	Sulfatos (mg/L)
Testigo	463a	407a	591a	243a	301a
Mezcla 10/60/30	4653c	1301c	1744b	1888c	2428bc
Mezcla 20/60/20	4703c	1263c	2073c	1977c	2601c
Mezcla 20/50/30	4153b	1188b	1628b	1530b	2324b
F-ANOVA	515,0***	505,1***	335,6***	642,9***	486,1***

Significación al $P < 0,001$ (***), $P < 0,01$ (**), $P < 0,05$ (*) y $P > 0,05$ (ns). En función de los diferentes sustratos, los valores en columna seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes ($P < 0,05$).

Respecto al potasio hidrosoluble, el testigo presentó una concentración de 463 mg/L, mientras que las mezclas 10/60/30 y 20/60/20 contenían las mayores concentraciones con 4653 y 4703 mg/L, respectivamente. Las concentraciones más altas de sodio se presentaron en las mezclas 10/60/30 y 20/60/20, con 1301 y 1263 mg/L, posiblemente debido al mayor contenido de compost vegetal en su composición. El testigo mostró tan solo 407 mg/L de sodio hidrosoluble.

La mayor cantidad de nitratos se encontró en la mezcla 20/60/20 con una cantidad de 2073 mg/L, respecto al testigo que presentó una concentración bastante más baja de nitratos, 591 mg/L. La presencia de los compost en las mezclas ternarias podría

explicar este mayor contenido en nitratos, tal como se ha visto en otros estudios utilizando compost como ingredientes de sustratos de cultivo (Medina y col., 2009; Bustamante y col., 2008).

En cuanto a los cloruros, el testigo mostró una concentración de 243 mg/L, mientras que las mayores concentraciones se encontraron en las mezclas 10/60/30 y 20/60/20, con 1888 y 1977 mg/L. Los sulfatos presentan su menor concentración en el testigo, con 301 mg/L, y su mayor concentración en las mezclas 10/60/30 y 20/60/20, con 2428 y 2601 mg/L.

La proporción creciente de los porcentajes de compost vegetal en las mezclas realizadas aumentó la cantidad de la mayoría de los iones hidrosolubles analizados, siendo muy significativo el efecto que provoca respecto al testigo utilizado.

4.1.2. Efectos sobre el material vegetal

4.1.2.1 Lechuga

a) Nascencia y germinación

○ Porcentaje de germinación

Los resultados obtenidos en las pruebas de germinación de lechuga en los sustratos utilizados mostraron diferencias significativas en los diferentes medios de cultivo realizados. En la Figura 4.9 se pueden observar los resultados de las pruebas de germinación realizadas a los distintos sustratos ensayados.

Estadísticamente hay 3 rangos diferenciados por el porcentaje de germinación obtenido en las pruebas. El testigo utilizado obtuvo el mejor resultado, cerca de un 97% de germinación. Las diferentes mezclas presentaron valores inferiores de germinación, siendo el más bajo en la mezcla 10/60/30. Las mezclas 20/60/20 y 20/50/30 presentaron porcentajes de germinación intermedia entre el testigo utilizado

y la mezcla con peor resultado, cerca del 90%. Gracias a estos datos podemos pensar que la adición de compost vegetal en las mezclas inhibe o retrasa ligeramente la germinación, posiblemente debido al aumento de la conductividad eléctrica antes mencionada en los parámetros físico-químicos.

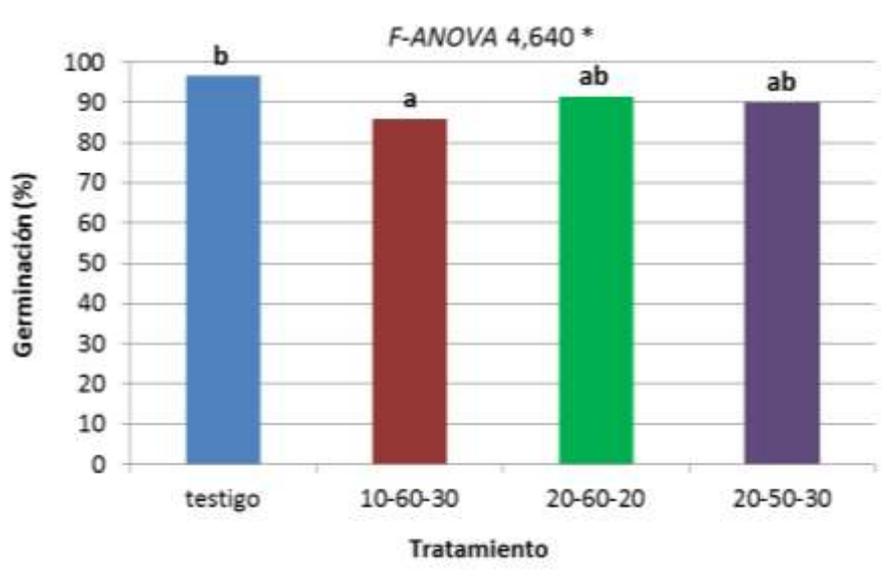


Figura 4.9. Incidencia de los tratamientos establecidos sobre la germinación en el cultivo de la lechuga de los sustratos ensayados. Para cada tipo de compost, letras distintas implican tratamientos estadísticamente diferentes ($P < 0,05$).

b) Parámetros morfológicos

○ Altura

El desarrollo de las plántulas ha sido cuantificado mediante la medida de altura, con varias repeticiones a lo largo de su ciclo comercial en el semillero. En la Figura 4.10 se puede observar la altura promedio para cada sustrato utilizado.

Estadísticamente solo hay dos categorías, que registran el mejor promedio de altura: en el testigo utilizado, con unos 4,8 cm aproximadamente, y las mezclas ternarias. Las mezclas propuestas no mostraron diferencias significativas entre sí, presentando valores más bajos de la altura de plántula respecto al testigo

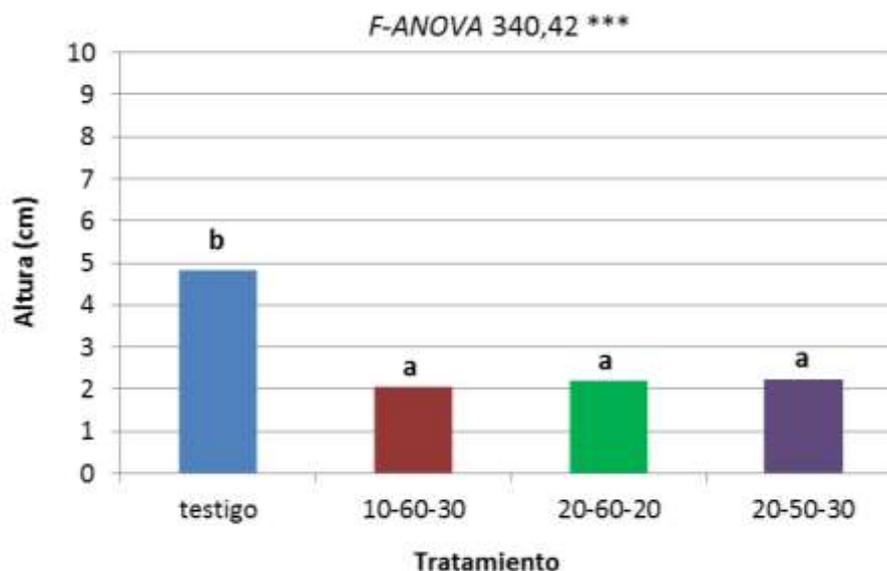


Figura 4.10. Incidencia de los tratamientos establecidos sobre el crecimiento en altura en el cultivo de la lechuga de los sustratos ensayados. Para cada tipo de compost, letras distintas implican tratamientos estadísticamente diferentes ($P < 0,05$).

○ **Producción de biomasa, de parte aérea y de raíz**

Para el análisis de la biomasa de lechuga que se ha obtenido con el uso de los sustratos utilizados, se ha determinado el peso fresco y seco de la parte aérea. En la Tabla 4.3 se pueden observar los datos obtenidos para los diferentes sustratos utilizados. El uso del sustrato testigo ha obtenido para todos los parámetros el mejor resultado, tanto en el peso fresco y seco, como en la biomasa en fresco y seco.

En el peso fresco de la parte aérea, el testigo presentó el mayor peso fresco con 1,831 g de peso promedio, mientras que la mezcla 10/60/30 mostró el menor peso fresco. Las mezclas 20/60/20 y 20/50/30 estadísticamente no difirieron significativamente. En el peso seco de la parte aérea podemos ver que en el sustrato testigo se ha incrementado la pérdida de peso debido a la cantidad de agua que almacenaron las plántulas. Las mezclas ternarias preparadas no fueron significativamente diferentes en cuanto al peso seco, mostrando aproximadamente el mismo valor.

En cuanto a la biomasa, tanto en fresco como en seco, las mezclas realizadas tuvieron un peor comportamiento que el testigo, presentando la mitad del valor de biomasa respecto del sustrato comercial.

Tabla 4.3. Producción de biomasa de lechuga de los diferentes sustratos utilizados.

Tipo de sustrato	Peso fresco parte aérea (g)	Peso seco parte aérea (g)	Biomasa fresca (g)	Biomasa seca (g)
Testigo	1,831c	0,209b	3,40b	0,340b
Mezcla 10/60/30	0,585a	0,097a	1,62a	0,153a
Mezcla 20/60/20	0,811b	0,091a	1,66a	0,147a
Mezcla 20/50/30	0,776b	0,100a	1,56a	0,151a
F-ANOVA	77,691***	95,634***	123,18***	147,54***

Significación al $P < 0,001$ (***), $P < 0,01$ (**), $P < 0,05$ (*) y $P > 0,05$ (ns). En función de los diferentes sustratos, los valores en columna seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes ($P < 0,05$).

En la Tabla 4.4 se han representado los valores que se obtuvieron del muestreo de raíces realizado, teniendo en cuenta el peso fresco y seco de la raíz, además de los ratios de peso fresco de la parte aérea entre en peso fresco de la raíz, y del peso seco de la parte aérea entre el peso seco de la raíz.

En cuanto al peso fresco de la raíz se puede observar que el testigo mostró el doble de valor que las mezclas utilizadas. En el peso seco de raíz se observa que el testigo presentaba mayor peso que las mezclas ternarias.

En cuanto a las ratios entre los pesos de parte aérea y raíz, se observa que el comportamiento de las plántulas en cuanto al desarrollo de cada parte no mostró diferencias significativas entre ninguno de los sustratos utilizados, excepto la mezcla 20/50/30 que tuvo mayor ratio de peso seco de parte aérea y raíz que los demás.

Tabla 4.4. Ratios de parte aérea y raíz de lechuga en los diferentes sustratos utilizados.

Tipo de sustrato	Peso fresco raíz (g)	Peso seco raíz (g)	Ratio Pfa/Pfr	Ratio Psa/Psr
Testigo	1,461b	0,130b	1,33a	1,61a
Mezcla 10/60/30	0,667a	0,056a	1,42a	1,62a
Mezcla 20/60/20	0,689a	0,056a	1,44a	1,73a
Mezcla 20/50/30	0,624a	0,051a	1,51a	1,99b
F-ANOVA	132,25***	160,31***	1,502ns	8,223**

Significación al $P < 0,001$ (***), $P < 0,01$ (**), $P < 0,05$ (*) y $P > 0,05$ (ns). En función de los diferentes sustratos, los valores en columna seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes ($P < 0,05$).

○ Calidad de raíz

Se ha determinado la calidad de raíz en el cepellón para evaluar el comportamiento de la planta en los diferentes sustratos. La Tabla 4.5 indica los valores obtenidos en los parámetros de densidad, tipo y color de las raíces. Una adecuada densidad de raíz asegura un adecuado y exitoso trasplante desde la bandeja de germinación al medio de cultivo donde se desarrollará la plántula.

Se categorizó la escala del 1 al 5 de cada plántula en el momento de trasplante, siendo el valor 1 el que indica una baja densidad y el 5 el que implica alta densidad de raíz (Medina y col., 2009). El testigo tuvo el mayor valor, el cual se fijó como baremo para evaluar las diferentes mezclas. Las tres mezclas ternarias no tuvieron diferencias significativas en cuanto a la densidad de raíz. Presentaron la mitad de calidad de densidad de raíz que el testigo.

La consideración y evaluación del tipo de raíz se realiza mediante determinación visual de la tipología y grosor de las raíces de la plántula-cepellón, categorizando del 1 al 5 cada plántula en el momento del transplante, siendo el valor 1 el que indica una raíz débil y delgada y el 5 el que implica una raíz fuerte y gruesa, siendo deseable buenos

grosos para garantizar un mejor transplante (Medina y col., 2009). Teniendo en cuenta este criterio, las mezclas realizadas no tienen diferencias significativas entre ellas, pero si sobre el testigo utilizado, siendo inferiores al testigo.

Tabla 4.5. Parámetros sobre calidad de raíz de lechuga en los diferentes sustratos utilizados.

Tipo de sustrato	Densidad	Tipo	Color
Testigo	5,00b	5,00b	5,00c
Mezcla 10/60/30	2,79a	3,15a	3,08b
Mezcla 20/60/20	2,21a	2,65a	3,15b
Mezcla 20/50/30	2,79a	3,00a	2,21a
F-ANOVA	60,132***	58,772***	96,750***

Significación al $P < 0,001$ (***), $P < 0,01$ (**), $P < 0,05$ (*) y $P > 0,05$ (ns). En función de los diferentes sustratos, los valores en columna seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes ($P < 0,05$).

La consideración y evaluación del color de raíz se realiza mediante determinación visual del color de las raíces de la plántula-cepellón, en función de la tonalidad más blanca o más oscura, categorizando del 1 al 5 cada plántula en el momento de transplante, siendo el valor 1 el que indica una raíz oscura y el 5 el que implica una raíz blanca. El rango de comparación se inicia considerando 5 aquella más blanca de todo el experimento, siendo deseable colores claros que son indicativos de un mejor tránsito de xilema y floema (Medina y col., 2009).

La mezcla que peor resultado obtuvo es la 20/50/30 con un 2,21 sobre 5. Las mezclas 10/60/30 y 20/60/20 son estadísticamente iguales con un valor de 3,08 y 3,15 sobre 5, respectivamente. En este parámetro también se puede observar que existen diferencias significativas entre el uso del testigo y las mezclas ternarias realizadas.

4.1.2.2 Brócoli

a) Nascencia y germinación

○ Porcentaje de germinación

El porcentaje de germinación del brócoli en el ensayo realizado con las mezclas ternarias y el testigo utilizado se ha representado en la Figura 4.11. En este cultivo, el sustrato comercial utilizado no presentó diferencias significativas respecto de las mezclas 20/60/20 y 20/50/30, teniendo un porcentaje de germinación mayor al 90%. La mezcla 10/60/30 presentaba un nivel de nascencia cercano al 80%.

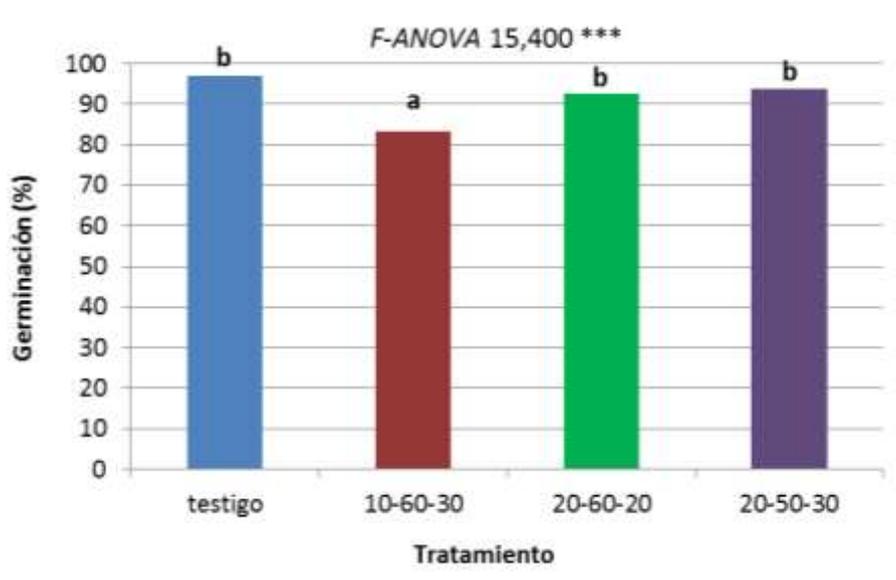


Figura 4.11. Incidencia de los tratamientos establecidos sobre la germinación en el cultivo de brócoli de los sustratos ensayados. Para cada tipo de compost, letras distintas implican tratamientos estadísticamente diferentes ($P < 0,05$).

b) Parámetros morfológicos

○ Altura

En la Figura 4.12 se representan las alturas medias de las plántulas de brócoli que se han obtenido en los diferentes sustratos utilizados. El sustrato testigo presentó la

mayor altura media, de 6,5 cm. Los sustratos 20/60/20 y 20/50/30 estadísticamente no presentaron diferencias, y la altura se aproximó a los 4 cm. El sustrato 10/60/30 obtuvo una altura media de 2,9 cm, siendo el valor más inferior de los sustratos utilizados. En este cultivo también se presentaba una diferencia significativa entre el uso del sustrato testigo y las mezclas realizadas.

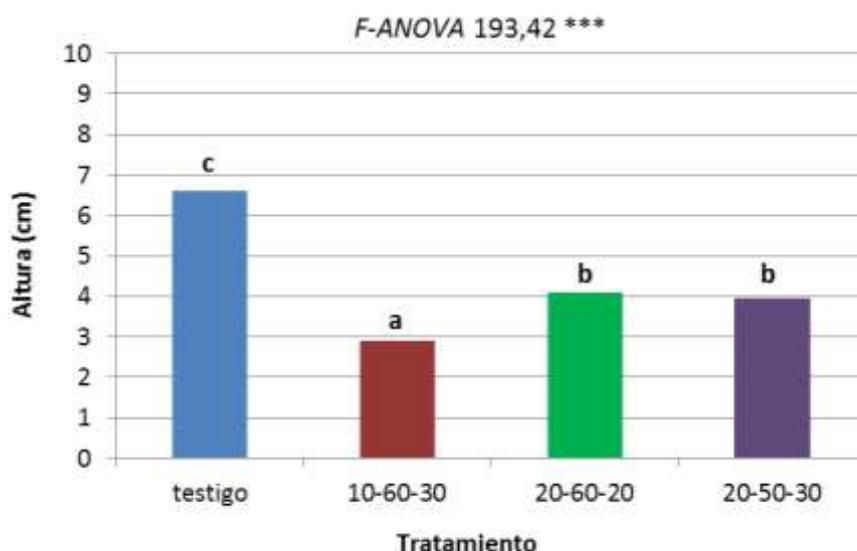


Figura 4.12. Incidencia de los tratamientos establecidos sobre el crecimiento en altura en el cultivo de brócoli de los sustratos ensayados. Para cada tipo de compost, letras distintas implican tratamientos estadísticamente diferentes ($P < 0,05$).

○ **Producción de biomasa, de parte aérea y de raíz**

En la Tabla 4.6 se exponen los resultados obtenidos en el muestreo de los pesos frescos y secos de la parte aérea de brócoli y la biomasa producida. El sustrato utilizado como testigo presentó el mayor valor para todos los parámetros obtenidos. Presentaba un peso fresco medio de la parte aérea de 1,831 g y peso seco medio de parte aérea de 0,361 g. En cuanto a biomasa fresca, tenía un valor de 2,259 g y de biomasa seca de 0,427 g.

La mezcla 10/60/30 presentó los valores más inferiores de los registrados en el uso de los sustratos ensayados. Entre el testigo y las mezclas realizadas hubo una diferencia significativa en todos los parámetros citados.

Tabla 4.6. Producción de biomasa de brócoli de los diferentes sustratos utilizados.

Tipo de sustrato	Peso fresco parte aérea (g)	Peso seco parte aérea (g)	Biomasa fresca (g)	Biomasa seca (g)
Testigo	1,831c	0,361c	2,259c	0,427c
Mezcla 10/60/30	0,585a	0,102a	0,666a	0,139a
Mezcla 20/60/20	0,811b	0,165b	1,012b	0,206b
Mezcla 20/50/30	0,776b	0,160b	0,948b	0,206b
F-ANOVA	264,06***	250,55***	361,33***	256,10***

Significación al $P < 0,001$ (***), $P < 0,01$ (**), $P < 0,05$ (*) y $P > 0,05$ (ns). En función de los diferentes sustratos, los valores en columna seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes ($P < 0,05$).

En la Tabla 4.7 se exponen los valores de los ratios de parte aérea y raíz, además del peso fresco y seco de raíz. El peso fresco y el peso seco de las raíces siguieron la misma relación que en la parte aérea, siendo el testigo el que presentó mayor peso fresco y seco de raíz, con 0,428 g y 0,066 g, respectivamente.

La mezcla 10/60/30 tuvo los valores de peso inferiores a los demás sustratos con 0,081 g de peso fresco de raíz y 0,036 g en peso seco. Se observa una diferencia significativa entre los valores obtenidos en el uso del sustrato testigo a los obtenidos en las mezclas ternarias realizadas.

Tabla 4.7. Ratios de parte aérea y raíz de brócoli en los diferentes sustratos utilizados.

Tipo de sustrato	Peso fresco raíz (g)	Peso seco raíz (g)	Ratio Pfa/Pfr	Ratio Psa/Psr
Testigo	0,428c	0,066c	4,33a	5,52c
Mezcla 10/60/30	0,081a	0,036a	7,31b	2,83a
Mezcla 20/60/20	0,202b	0,041ab	4,10a	4,07b
Mezcla 20/50/30	0,172b	0,046b	4,58a	3,52ab
F-ANOVA	137,75***	40,335***	19,324***	27,164***

Significación al $P < 0,001$ (***), $P < 0,01$ (**), $P < 0,05$ (*) y $P > 0,05$ (ns). En función de los diferentes sustratos, los valores en columna seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes ($P < 0,05$).

En las ratios de peso fresco de la parte aérea entre el peso fresco de las raíces, se observa que las mezclas 20/60/20 y 20/50/30 no presentaron diferencias significativas respecto del testigo. La mezcla 10/60/30 presentó una ratio mayor que los demás, de 7,31. En cuanto a la ratio de peso seco de la parte aérea y de raíz, el testigo tuvo una ratio de 5,52 siendo el máximo valor para los sustratos utilizados. Las mezclas 20/60/20 y 20/50/30 fueron estadísticamente iguales, y presentaban un valor cercano a 4, mientras que la mezcla 10/60/20 tuvo el valor inferior, de 2,83.

○ Calidad de raíz

Se ha determinado la calidad de raíz en el cepellón para evaluar el comportamiento de la planta en los diferentes sustratos. La Tabla 4.8 indica los valores obtenidos en los parámetros de densidad, tipo y color de las raíces. Tal como ya se comentó en el cultivo de lechuga, los parámetros de calidad de raíz aseguran un adecuado y exitoso trasplante desde la bandeja de germinación al medio de cultivo donde se desarrollará la plántula. Al igual que en el cultivo de lechuga, la estimación de la calidad se realizó para densidad, tipo y color usando la escala del 1 al 5 de cada plántula en el momento de trasplante, siendo el valor 1 el que indica un bajo valor y 5 el que implica un valor alto (Medina y col., 2009).

El testigo tuvo el mayor valor, el cual se fijó como baremo para evaluar las diferentes mezclas. Las tres mezclas presentaron una diferencia significativa entre ellas, y con el testigo. La mezcla con el valor inferior es la mezcla 10/60/30 con un 2,21 sobre 5, aunque ninguna mezcla iguala al testigo utilizado.

Tabla 4.8. Parámetros sobre calidad de raíz de brócoli en los diferentes sustratos utilizados.

Tipo de sustrato	Densidad	Tipo	Color
Testigo	5,00d	5,00c	5,00d
Mezcla 10/60/30	2,21a	2,35a	2,85a
Mezcla 20/60/20	3,21c	3,35b	3,71c
Mezcla 20/50/30	2,50b	3,35b	3,21b
F-ANOVA	531,96***	239,68***	190,88***

Significación al $P < 0,001$ (***), $P < 0,01$ (**), $P < 0,05$ (*) y $P > 0,05$ (ns). En función de los diferentes sustratos, los valores en columna seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes ($P < 0,05$).

Respecto al tipo de raíz, las mezclas 20/60/20 y 20/50/30 fueron estadísticamente parecidas, y presentaron un 3,35 sobre 5, mostrando una diferencia significativa con el testigo.

En cuanto al color de raíz, El rango de comparación se inició considerando 5 aquella más blanca de todo el experimento, siendo deseable colores claros que son indicativos de un mejor tránsito de xilema y floema (Medina y col., 2009). La mezcla 10/60/30 presentaba el menor valor con un 2,85 sobre 5. Todas las mezclas tuvieron diferencias significativas entre ellas y el testigo utilizado.

4.2. EXPERIMENTO 2

4.2.1. Evaluación del efecto de los sustratos utilizados sobre las plántulas de lechuga mediante diferentes tipos de análisis estadísticos multivariantes

En el Experimento 2, la evaluación de los resultados obtenidos fue llevada a cabo de un modo muy diferente al método estadístico desarrollado en el Experimento 1, debido al gran número de sustratos considerados (21), así como al elevado número de variables implicadas. Para ello, se ha realizado un completo estudio estadístico de los resultados obtenidos mediante diferentes tipos de análisis estadísticos multivariantes, como son:

- Análisis de componentes principales (PCA, Principal Component Analysis).
- Análisis clúster jerárquico (HCA, Hierarchical Cluster Analysis).
- Análisis clúster no jerárquico con el método de K-medias (Non-hierarchical k-means Cluster Analysis).

a) Análisis de componentes principales (PCA)

En el componente 1 se han incluido todos los parámetros relacionados con los parámetros morfológicos y la respuesta de la planta ante los sustratos utilizados. El componente 2 incluye el índice de germinación, además de propiedades hidro-físicas de los sustratos. El componente 3 está formado por los ratios de peso fresco de la parte aérea y raíz., y peso seco de la parte aérea y raíz.

El análisis de PCA extrajo 3 componentes principales que explicaban juntas más del 89,7% de la varianza total, con dos de los principales componentes suponiendo el 46,2% y el 35,9% de la varianza total (Tabla 4.9). El Componente 1 agrupaba a los parámetros relacionados con la morfología y la respuesta de la planta (con una correlación directa entre todos ellos), excepto la germinación, incluido en el Componente 2, y las ratios de partes aéreas/raíces tanto en fresco como en seco (Componente 3).

El Componente 2 incluía todos los parámetros relacionados con el sustrato, aparte del ya comentado índice de germinación, directamente correlacionado con los parámetros de la materia orgánica de los sustratos, la porosidad y la capacidad de aireación, e inversamente correlacionado con la densidad aparente y la capacidad de retención hídrica.

Tabla 4.9. Matriz de componentes obtenidas con el análisis de componentes principales (PCA).

Parámetro	Componente 1	Componente 2	Componente 3
Peso fresco parte aérea (FWa)	0.81		
Peso seco parte aérea (DWA)	0.90		
Peso fresco de raíz (FWr)	0.95		
Peso seco de raíz (DWr)	0.93		
Altura de planta (H)	0.92		
Tipo de raíz (Tr)	0.86		
Densidad de raíz (Dr)	0.94		
Color de raíz (Cr)	0.93		
Germinación (GI)		-0.53	
Materia orgánica total (TOM) ¹		-0.79	
Densidad aparente (BD) ¹		0.91	
Espacio poroso total (TPS) ¹		-0.89	
Capacidad de retención hídrica (TWHC) ¹		0.90	
Capacidad de aireación (air capacity) ¹		-0.95	
Contracción (shrinkage) ¹		0.76	
Ratio FWa/FWr			0.85
Ratio DWA/DWr			0.79
<i>Varianza explicada (%)</i>			

¹Parámetro relacionado con el medio de cultivo.

Si se representan los valores de los coeficiente de los Componentes 1 y 2 (Fig. 4.13), se obtiene una muy bien definida clasificación de los tratamientos que utilizan el compost de tronco de palmera (CT en la figura 4.13) y el de compost de hoja de palmera (CL en la figura 4.13) en la proporción más alta en el sustrato (80-100%), relacionada con una

alta densidad aparente (BD en la figura 4.13), contracción y ratio parte aérea/biomasa raíz, lo que probablemente indica problemas de elongación de la raíz.

Los sustratos con hoja de palmera se localizaron en la zona negativa del Componente 2 (PC2), relacionado con altos valores de materia orgánica y de capacidad de aireación. La producción de biomasa y los parámetros morfológicos se localizaron en la zona positiva del Componente 1 (PC1), estando relacionados con los sustratos con compost de hoja de palmera al 20%-40% (CL20 y CL40) y con el sustrato con compost de tronco de palmera al 20% (CT20), indicando para estos sustratos una óptima combinación entre propiedades físicas y químicas.

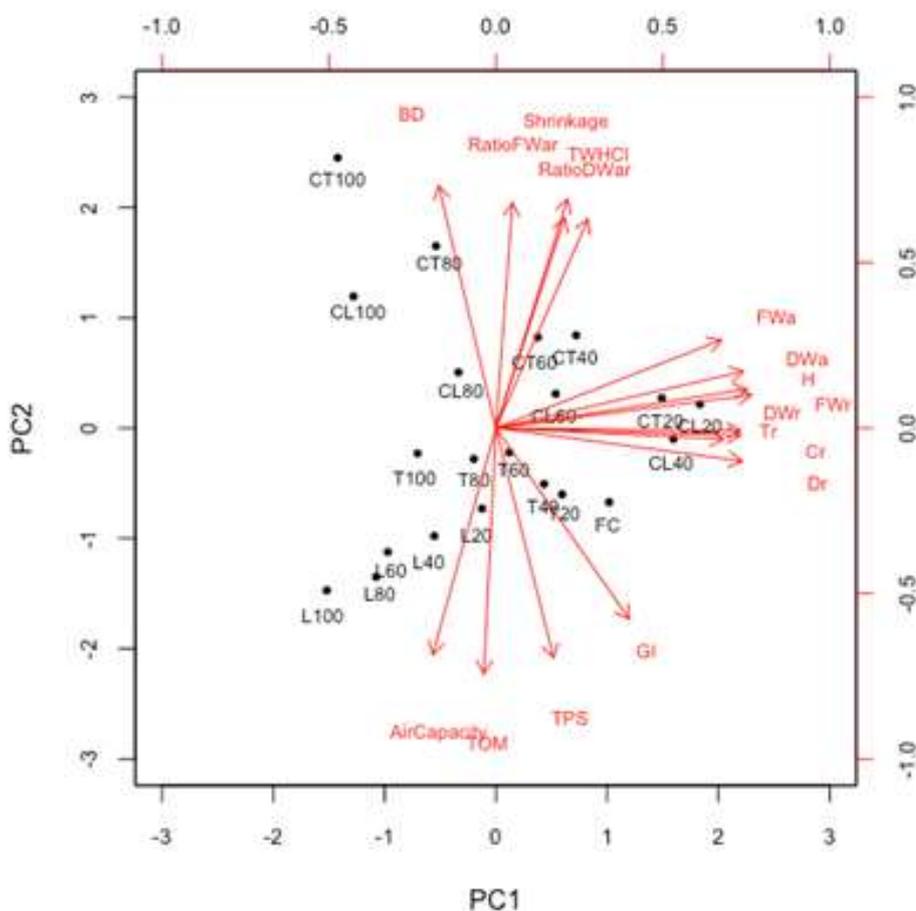


Figura 4.13. Componentes principales (PC1 y PC2) obtenidos al realizar el análisis de componentes principales (PCA) a los parámetros considerados. Las flechas representan la proyección (contribución) de las variables.

b) Análisis clúster jerárquico (HCA)

En la Figura 4.14 se muestra el resultado del análisis clúster jerárquico, que identificaba cuatro clúster, lo cual confirma los resultados obtenidos con el PCA:

1. Un grupo formado por tres tratamientos, hoja de palmera al 60%, 80% y 100% (L60, L80 and L100), asociado al uso de este material como ingrediente del sustrato.
2. Grupo que engloba al tratamiento control de fibra de coco (FC) y al resto de sustratos con los residuos de palmera (hoja y tronco) no compostados.
3. Grupo formado por tres sustratos elaborados con compost, en bajos porcentajes de sustitución, CL20-40 y CT20.
4. Grupo formado por los sustratos con compost al 80 y 100% de sustitución de fibra de coco, y el tratamiento con compost de tronco de palmera al 40%.

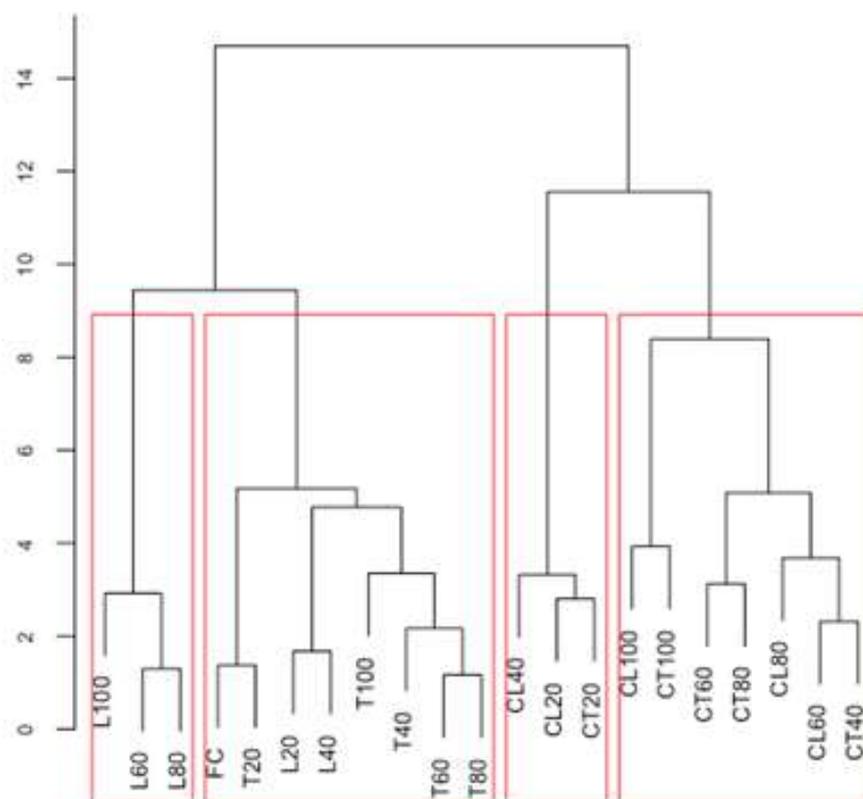


Figura 4.14. Resultados del análisis jerárquico de cluster realizado a los tratamientos (distancia Euclídea, regla de amalgamación según el método de Ward).

c) Análisis clúster no jerárquico con el método de K-medias

Para intentar comprender cuáles eran los principales y más determinantes parámetros para seleccionar los mejores materiales y proporciones de sustitución para los sustratos, también se llevó a cabo un análisis clúster no jerárquico con el método de K-medias. La mejor clasificación de las muestras se obtuvo para cuatro clúster, lo cual confirma los resultados preliminares del análisis HCA (Tabla 4.10 y Fig. 4.15).

Tabla 4.10. Valor medio de las variables observadas por el método de K-medias.

Variable	Cluster-1	Cluster-2	Cluster-3	Cluster-4	p-valor	Sign.
FWa	0.69 ± 0.16	0.05 ± 0.01	0.25 ± 0.07	0.22 ± 0.06	0.0012	**
DWa	0.046 ± 0.010	0.004 ± 0.001	0.023 ± 0.007	0.013 ± 0.004	0.0006	***
FWr	0.35 ± 0.08	0.05 ± 0.01	0.20 ± 0.06	0.10 ± 0.05	0.0008	***
DWr	0.029 ± 0.007	0.007 ± 0.002	0.021 ± 0.007	0.008 ± 0.004	0.0027	**
Ratio FWar	2.0 ± 0.4	1.0 ± 0.2	1.2 ± 0.2	2.5 ± 0.5	0.0032	**
Ratio DWar	1.6 ± 0.4	0.7 ± 0.2	1.1 ± 0.3	1.8 ± 0.4	0.0023	**
H	3.3 ± 0.9	1.0 ± 0.2	1.9 ± 0.5	1.4 ± 0.3	0.0017	**
Dr	2.4 ± 0.4	1.0 ± 0.5	1.9 ± 0.5	0.8 ± 0.3	0.0042	**
Tr	2.2 ± 0.5	1.0 ± 0.4	1.9 ± 0.4	1.1 ± 0.3	0.0073	**
Cr	2.4 ± 0.4	1.4 ± 0.6	2.0 ± 0.4	1.3 ± 0.5	0.0092	**
GI	98.8 ± 0.8	99.0 ± 0.5	95 ± 8	37 ± 27	0.0351	*
TOM	67 ± 7	93.1 ± 0.9	82 ± 14	51 ± 8	0.0044	**
BD	0.14 ± 0.03	0.07 ± 0.01	0.14 ± 0.05	0.26 ± 0.06	0.0057	**
TPS	92.1 ± 1.4	95.4 ± 0.5	91.1 ± 2.8	86.0 ± 2.4	0.0064	**
Shrinkage	17.7 ± 0.5	8.6 ± 2.0	13.3 ± 4.2	21.5 ± 3.7	0.0075	**
TWHC	474 ± 54	268 ± 98	460 ± 71	574 ± 147	0.0151	*
Air Capacity	44.7 ± 6.2	68.6 ± 10.4	45.1 ± 7.5	28.6 ± 16.9	0.0112	*
Tratamientos por clúster	CL20, CL40, CL60, CT20, CT40	L40, L60, L80, L100	FC, L20, T20, T40, T60, T80, T100, CL80, CT60	CL100, CT80, CT100		

Significado de los acrónimos en la Tabla 4.9.

Todos los parámetros fueron significativamente diferentes en los clúster. El Grupo 1 incluía los sustratos elaborados con compost de hoja de palmera al 20%, 40% y 60% (CL20, CL40 y CL60) y con compost de tronco de palmera al 40% de sustitución (CT40), mostrando estas mezclas la mejor respuesta de las plántulas de lechuga respecto a parámetros como la germinación, la producción de biomasa y la altura de plántula, pero también en una equilibrada ratio entre la parte aérea y la raíz. Diferentes estudios han relacionado una óptimamente equilibrada ratio parte aérea/raíz como un parámetro clave para obtener un trasplante eficiente (Ceglie y col., 2015).

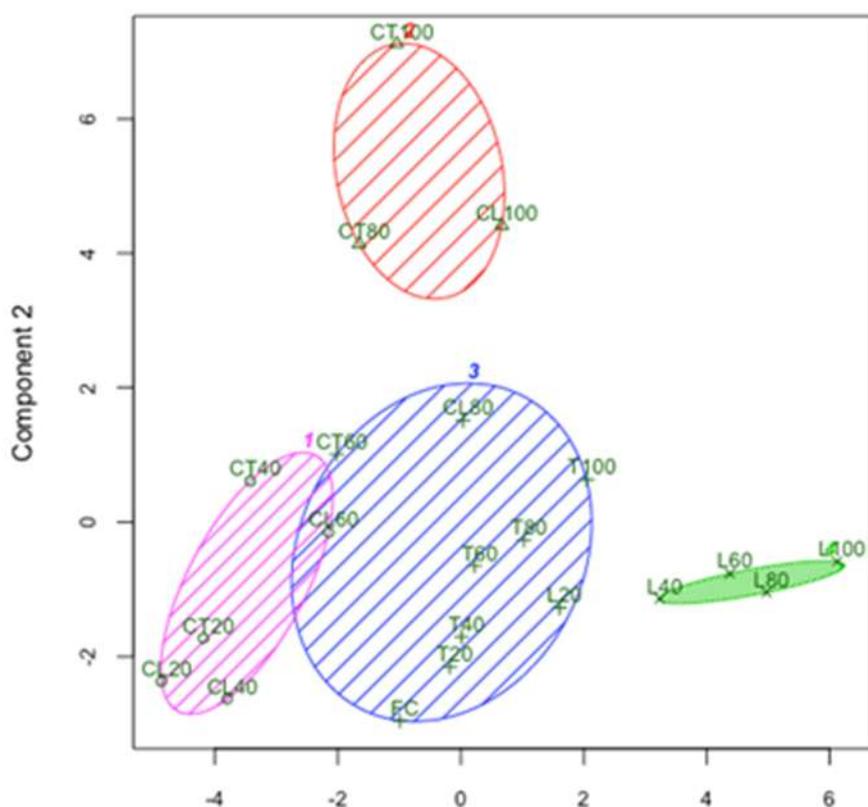


Figura 4.15. Contribuciones de los tratamientos utilizando las Componentes 1 y 2 obtenidas del análisis no-jerárquico de clúster.

Los materiales sin compostar, como la hoja de palmera, estuvieron en los dos clúster que alcanzaron los valores de germinación más altos, pero el desarrollo de la biomasa fue el más bajo, probablemente debido a la baja biodisponibilidad de nutrientes, pero también debido a la baja capacidad de retención hídrica de estos materiales. Sin embargo, los tratamientos asociados al tronco de palmera sin compostar se agruparon en el clúster 3, mostrando una respuesta bastante buena de las plántulas de lechuga.

Estos resultados muestran que estos métodos son muy prometedores debido a su habilidad para resumir las propiedades promedio para un sustrato ideal para el cultivo de plántulas de lechuga, siendo en este estudio la mezcla con una densidad aparente de $0,14 \text{ g/cm}^3$, 92,1 % de espacio poroso total, 17,7% de contracción, una capacidad de retención hídrica de 474 mL/L de capacidad y una capacidad de aireación de 44.7%, todo esto considerando los valores promedio del clúster 1.

Sin embargo, el clúster 3 mostró valores similares para los medios de cultivo, con una producción de biomasa significativamente menor. Por tanto, el contenido de nutrientes en los tratamientos debe ser tenido en cuenta, puesto que estos tratamientos incluidos en el clúster óptimo son sustratos elaborados con compost (sustratos con CL y CT, en proporción superior al 60% y 40% de sustitución, respectivamente).

Por otra parte, la sustitución de fibra de coco con compost derivados de residuos de palmera tiene un límite de proporción, ya que en el clúster 4 se incluían los tratamientos con los porcentajes más altos de sustitución utilizando compost, con una calidad más baja de plántulas, mostrando probablemente una pérdida de calidad en las propiedades físicas, pero también alcanzando unos valores críticos de salinidad y de otros parámetros limitantes que reducen la germinación. Por ello, el objetivo debe ser el desarrollo de mezclas binarias o ternarias para cada tipo específico de cultivo, que considere el desarrollo óptimo de biomasa, también considerando la máxima reducción de turba o fibra de coco y utilizando compost para también cumplir los requisitos a nivel nutricional.

5. CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas en relación a los objetivos planteados en este trabajo fin de grado, son las siguientes:

- Todos los sustratos realizados mediante la mezcla de compost, utilizados en altas proporciones (>60%) no presentaron unas adecuadas propiedades físico-químicas y químicas para el desarrollo a nivel comercial de las plantas hortícolas empleadas, fundamentalmente debido a que induce un aumento en la salinidad de los materiales.
- Los sustratos elaborados con compost de hoja de palmera al 20%, 40% y 60% (CL20, CL40 y CL60) y con compost de tronco de palmera al 40% de sustitución (CT40), mostraron la mejor respuesta de las plántulas de lechuga respecto a parámetros como la germinación, la producción de biomasa y la altura de plántula, pero también una equilibrada ratio entre la parte aérea y la raíz.
- Los sustratos con compost de hoja de palmera al 20%-40% (CL20 y CL40) y con el sustrato con compost de tronco de palmera al 20% (CT20) mostraron una óptima combinación entre propiedades físicas y químicas.
- El uso de fibra de coco amortigua ciertas características físico-químicas y químicas que aumentan debido al uso de compost en las mezclas, tales como la conductividad eléctrica, el pH, el espacio poroso, la contracción y la capacidad de aireación.
- Los materiales sin compostar, como la hoja de palmera, tuvieron una alta germinación pero bajos niveles de biomasa, como consecuencia de la baja capacidad de retención hídrica y la poca biodisponibilidad de nutrientes. Sin embargo, los tratamientos asociados al tronco de palmera sin compostar presentaron una buena respuesta de las plántulas de lechuga.

- Las mezclas realizadas tuvieron una peor formación del cepellón respecto del sustrato comercial utilizado como testigo, originando posibles problemas al realizar el transplante de la bandeja, debido a las características de los materiales utilizados.

- En este estudio, y gracias a los métodos estadísticos utilizados se ha encontrado una mezcla óptima promedio para el cultivo de lechuga, que debería presentar una densidad aparente de 0,14 g/cm³, 92,1 % de espacio poroso total, 17,7% de contracción, una capacidad de retención hídrica de 474 mL/L de capacidad y una capacidad de aireación de 44,7%.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Abad, M., Martínez, M.D., Cegarra, J., Roig, A.F. y Martínez, J., 1993.** El compost de residuos y subproductos orgánicos como componentes de los medios de cultivo de las plantas ornamentales cultivadas en maceta. *Actas de Horticultura 10*: 1191- 1196.
- Abad, M., Noguera, P. y Bures, S. 2001.** National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: case study in Spain. *Bioresource Technology*.
- Abad, M.; Martínez, M.D.; Martínez, J., 1992.** Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Actas de horticultura 11*: 141-154.
- Abad. M., Fornes, F., Mendoza-Hernández, D y García de la Fuente, R., 2008.** Uso de compost como sustrato o componente de sustratos en viveros y semilleros. *Tendencias futuras. Actas de horticultura 53*: 14-25
- Actis, G; Luzzati, A.; Marchesni, A. y Sircusa, S., 1981.** Compost derived from bioconversion of urban wastes contents. *Studies on Environmental Science 9*, 163-191.
- Aguado Alonso, J., 1997.** Gestión de residuos sólidos urbanos. Reciclado. Cursos de verano de la Fundación General de la Universidad Complutense.
- Ansorena, J., 1994.** Sustratos. Propiedades y características. Ed. Mundi-Prensa. Madrid 172 p.
- Anuario de Estadística 2014. Estadísticas del Medio Ambiente. Residuos.** Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Anuario de Estadística 2014. Estadísticas del Medio Rural. Superficies y producciones de cultivos.** Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Borrero, C., Trillas, M. I., Ordovás, J., Tello, J. C., Avilés, M., 2004.** Predictive factors for the suppression of *Fusarium* wilt of tomato in plant growth media. *Phytopathology*, vol. 94, p. 1094 – 1101.
- Burés, S. 1997.** Sustratos. Ediciones Agrotécnicas S.L. Madrid. 342 p.
- Bustamante, M.A., Paredes, C., Moral, R., Agulló, E., Pérez-Murcia, M.D. and Abad, M., 2008.** Composts from distillery wastes as peat substitutes for transplant production. *Resour. Conserv. Recycl. 52*: 792-799.

- Carmona, E. y Abad, M. 2008.** Compostaje. Aplicación del compost en viveros y semilleros. Ed. Mundi-Prensa. 17: 397-424.
- Ceglie, F.G., Bustamante, M.A., Amara, M.B., Tittarelli, F., 2015.** The challenge of peat substitution in organic seedling production: optimization of growing media formulation through mixture design and response surface analysis. Plos One 10(6): e0128600. doi:10.1371/journal.pone.0128600.
- Chang, M.; Falcón, F.; Hoyos, M. y Rodríguez, A. 2004.** Manual Práctico de Hidroponía. 4ª ed. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina, Centro de Investigación de Hidroponía y Nutrición Mineral, Departamento de Biología. 100 p.
- Costa, F., García, C., Hernández, T. y Polo, A. 1991.** Residuos Orgánicos Urbanos. Manejo y Utilización. Ed.: CSIC-CEBAS. Murcia.
- Cotxarrera, L.; Trillas-Gay, M. I., Steinberg, C., Alabouvette, C., 2002.** Use of sewage sludge compost and *Trichoderma asperellum* isolates to suppress Fusarium wilt of tomato. Soil Biology and Biochemistry 34, 467-476
- Fernández, M.M., Aguilar, M.I., Carrique, J.R., Tortosa, J., García, C, López, M., Pérez J.M., 1998.** Suelo y medio ambiente en invernaderos. Consejería de Agricultura y pesca. Junta de Andalucía. Sevilla.
- GECT (Grupo de examen científico y técnico de Ramsar), IPS (International peat society) y IMCG (International mire conservation group).** Resolución VIII. 17: Lineamientos para la acción mundial sobre turberas. Manual de la convención de Ramsar: Guía a la convención sobre los humedales. Gland (Suiza): secretaria de la convención Ramsar, 2002, 15p.
- Gruda, N., Schnitzler, W. H., 2004.** Suitability of wood fiber substrate for production of vegetable transplants - I. Physical properties of wood fiber substrates. Scientia Horticulturae 100, 309-322.
- IGME (Instituto geológico y minero de España), 2010.** Panorama minero: turba y leonardita.
- Kipp, J.A., G. Wever and C. de Kreij, 2000.** International Substrate Guide. Elsevier.
- Lemaire, F., Dartigues, A., Rivière L. M., Charpentier, S. y Morel, P., 2005.** Cultivos en macetas y contenedores. Principios agronómicos y aplicaciones. Madrid. Ed. Mundi- Prensa. 210p

- Liski, J., Lehtonen, A., Palosuo, T., Peltoniemi, M., Eggers, T., Muukkonen, P. y Mäkipää, R., 2006.** Carbon accumulation in Finland's forests 1922–2004 – an estimate obtained by combination of forest inventory data with modelling of biomass, litter and soil. *Annals of Forest Science* 63: 687–697.
- López-Cuadrado, M.C. y Masaguer, A., 2006.** Sustratos para viveros: conocer sus propiedades ayuda a su correcta utilización. *Horticultura*, vol. Extra, p 44-40.
- Maher, M., Prasad, M. y Raviv, M. 2008.** Organic soilless media components. In *Soilless culture: Theory and practice*, ed. M. Raviv and J. H. Lieth, 459–504. Oxford: Elsevier.
- Martínez Fernández, M., 2011.** Implantación de un sistema de valorización de residuos orgánicos mediante vermicompostaje en la Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO). Trabajo Fin de Máster.
- Medina, E., Paredes, C., Pérez-Murcia, M.D., Bustamante, M.A., Moral, R., 2009.** Spent mushroom substrates as component of growing media for germination and growth of horticultural plants. *Bioresource Technology* 100, 4227–4232.
- Moral, R., C. Paredes, M. A. Bustamante, F. Marhuenda-Egea y M. P. Bernal. 2009.** Utilisation of manure composts by high-value crops: Safety and environmental challenges. *Bioresource Technology* 100: 5454–60.
- Noguera, P., Abad, M., Puchades, R., Maquieira, A. y Noguera, V. 2003.** Influence of particle size on physical and chemical properties of coconut coir dust as a container medium. *Commun. SoilSci. Plant Anal.* 34: 593-605.
- Penningdfield, F. y Kurzmann, P., 1983.** Cultivos hidropónicos y en turba. Ed. Mundi- Prensa-Madrid.
- Pérez-Murcia, M.D., Paredes, C., Santos, A., Bernal, M.P. y Moral, R.** Efecto del lavado como tratamiento sobre la calidad de compost de origen ganadero para su uso como sustratos en semillero
- Pudelski, T. 1987.** Horticultural use of compost. In: M. de Bertoldo, M.P. Ferranti, P. L'Hermite and F. Zucconi (eds). *Compost: Production, Quality and Use*. Pp. 20-29. Elsevier Applied Science, London.
- Raviv, M.; Chen, Y., Inbar, Y. 1986.** Peat and peat substitutes as growth media for container-growth plants. In: Y. Chen and Y. Avnimelech (Eds.). *The Role of Organic*

Matter in Modern Agriculture. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht (The Netherlands), pp. 257-287.

Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario.

Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. Disponible en: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2013-7540

Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo.

Zucconi, F. y De Bertoldi, M. 1987. Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste. En: Compost: Production, Quality and Use. Ed. M., de Bertoldi; M.P., Ferranti; P., L'Hermite y F., Zucconi. Elsevier. Barking, 30-50.

Páginas web consultadas:

<http://riegos.ivia.es/datos-meteorologicos>

<http://www.gautiersemences.com/>

<http://www.igme.es/internet/PanoramaMinero/PMLin.htm>

<http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/2014/default.aspx?parte=3&capitulo=13&grupo=6>

<http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/2014/default.aspx?parte=2&capitulo=08>

<http://www.sakata-vegetables.eu/vegetables/es/products/naxos-f1>

<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1990-26490>

https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2010-11153