



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

MASTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Efecto de la aplicación de cenizas de caldera de biomasa sobre las
propiedades del suelo y el crecimiento de cultivos**

Autora: Patricia Palomar García
Tutor: Francisco Lafuente Álvarez
Co-tutora: Ruth Cristina Martín Sanz

Valladolid, Septiembre, 2022



Resumen:

La combustión de biomasa agrícola y forestal constituye una fuente de energía en pleno crecimiento por ser un recurso más sostenible y económico frente a otros combustibles. Como resultado de esta combustión se obtienen cenizas que a día de hoy, son consideradas residuo cuyo ciclo de vida se cierra destinándose a vertedero. Para reducir su deposición final, se pretende revalorizar a subproducto, promoviendo la economía circular mediante su aplicación como fertilizante en el sector agrícola. Su aplicación en los suelos viene dada por ser consideradas residuo No peligroso, al no contener metales pesados por provenir de masas vegetales, por contener minerales que aportan nutrientes principalmente K, Ca, P y Mg y otros elementos como óxidos que al reaccionar con agua se transforman en hidróxidos de carácter alcalino, elevando el pH.

La presente investigación se dirigió a gestionar este residuo mediante su aplicación como enmienda en 2 suelos ácidos con diferentes textura, franco-arcillosa y arenosa, observándose sus efectos en el pH y capacidad de retención de humedad y en la germinación y crecimiento de cultivos de *Lactuca sativa* (lechuga) y *Triticum aestivum* (trigo). La experiencia se desarrolló en un invernadero de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia donde se realizaron cuatro tipos de tratamientos para ambos suelos, calculados para provocar un aumento moderado de pH, tres dosis de cenizas (1, 2 y 3% en el suelo franco-arcilloso y 0,1, 0,2 y 0,3% en el arenoso) comparándose con el efecto alcalino provocado por el hidróxido de calcio. Tras el ensayo, se obtuvo una respuesta proporcional del crecimiento de los cultivos frente al aumento de dosis de ceniza, provocado por el incremento del pH de los suelos y el aporte de nutrientes. Por ello, es de gran utilidad el uso de esta enmienda como abono ya que corrige las deficiencias del suelo ante la degradación y se evita la generación de residuos.

Abstract:

The combustion of agricultural and forestry biomass constitutes a full source of energy as it is more sustainable and economical resource than other fuels. Ashes have been obtained as a result of this combustion; nowadays these ashes are considered a waste whose life cycle is closed and sent to landfill. To reduce its final deposition, it is intended to revalue a by-product, promoting the circular economy through its application as a fertilizer in the agricultural sector. Its application in soils is given by being considered non-hazardous waste, as it does not contain heavy metals for the reason that it comes from plant masses and because it contains minerals that provide nutrients as mainly K, Ca, P and Mg and other elements such as oxides that



Universidad de Valladolid



when they react with water, these oxides are transformed into alkaline hydroxides, raising, in this way, the pH.

The present investigation is aimed at managing this residue through its application as an amendment in 2 acid soils with different textures, clay-loam and sandy soils, observing its effects on the pH and its moisture retention capacity and on the germination and growth of *Lactuca sativa* (lettuce) and *Triticum aestivum* (wheat). The experience was developed in a greenhouse of the Higher Technical School of Agricultural Engineering of Palencia where four types of treatments were carried out for both soils, calculated to cause a moderate increase in pH, three doses of ashes (1, 2 and 3% in the clay-loam soil and 0.1, 0.2 and 0.3% in the sandy soil) compared with the alkaline effect caused by calcium hydroxide. After the test, a proportional response was obtained in the growth of the crops against the increase in the dose of ash, caused by the increase in the pH of the soils and by the contribution of nutrients. For this reason, the use of this amendment as a fertilizer is very useful since it corrects the deficiencies of the soil in the face of degradation and it also avoids the creation of waste.



Universidad de Valladolid



Agradecimientos:

A Francisco Lafuente Alvarez, Profesor Titular del Área de Edafología y Química Agrícola de la Universidad de Valladolid, por compartir sus conocimientos y brindarme sus experiencias profesionales además de todas sus aportaciones durante la experiencia y su buen trato en todo momento. Dentro de este área, agradecer también a Ruth Cristina Martín Sanz y Carmen Blanco de Castro por su ayuda y amabilidad.

A mi familia y amigos simplemente por estar ahí.



Índice

Introducción	1
1.1. Importancia de los suelos y su conservación	1
1.2. Causas de la degradación de los suelos y factores que contribuyen a mantener su salud	2
1.3. Aportación de cenizas como enmienda	4
Objetivos	8
Material y métodos	9
3.1. Materiales	9
3.1.1. Suelos	9
3.1.2. Cenizas	9
3.1.3. Hidróxido cálcico, $\text{Ca}(\text{OH})_2$	10
3.1.4. Especies vegetales seleccionadas	10
3.2. Métodos analíticos	10
3.2.1. Determinación de necesidades de encalado y medida de pH	11
3.2.2. Determinación de la humedad higroscópica	13
3.2.3. Capacidad de retención de agua	13
3.3. Aplicación de las dosis de ceniza e hidróxido cálcico	14
3.4. Diseño experimental del cultivo en invernadero	16
3.6. Seguimiento de la germinación e inicio del desarrollo	17
3.7. Condiciones de riego	17
3.8. Determinación de biomasa producida	18
3.9. Análisis estadístico	18
Resultados y discusión	19
4.1. Efecto en el pH	19
4.2. Humedad higroscópica	20
4.3. Capacidad de retención de humedad	20
4.4. Germinación de las especies vegetales	22
4.5. Crecimiento vegetal	23
Conclusión	29
Bibliografía	30
Anexos	35



1. Introducción

1.1. Importancia de los suelos y su conservación

En términos generales, el suelo se puede definir como el lugar de la superficie terrestre donde se desarrollan los horizontes a partir de la roca madre, que está en constante cambio de energía y materia con la hidrosfera, atmósfera y biosfera.

Su formación, y por lo tanto características, dependen de varios factores como la roca madre (material originario), clima, interacción de los organismos vivos, geomorfología y el tiempo de acción de estos factores. Todo esto contribuye a la composición de diversas situaciones territoriales necesarias para la vida.

La composición de un suelo es muy variada, considerándose los siguientes elementos:

- Minerales, derivan de la roca madre siendo transformados por la erosión, pudiendo diferenciarse según su textura en arcillosa, limosa y arenosa.
- Materia orgánica, es muy rica en nutrientes ya que es producto de la degradación de especies vegetales incluyendo fracción insoluble y soluble siendo esta proporción más pequeña (Spark y Swift, 2002). Es la parte del suelo que aporta energía.
- Microorganismos, son los encargados de degradar la materia orgánica, comenzando el proceso por los que la fragmentan y siguiendo por los descomponedores, los cuales aprovechan esta materia para liberar elementos como el nitrógeno y fósforo necesarios para otros organismos primarios.
- Porosidad, son espacios que se crean en el suelo de mayor o menor tamaño dependiendo de la textura de este. Pueden estar ocupados por agua y aire, necesarios para la productividad vegetal. Esto determina la permeabilidad del suelo, siendo en un suelo arcilloso las partículas muy pequeñas donde apenas dejan hueco y se puede producir compactación que favorece el encharcamiento, y en un suelo arenoso los huecos son más grandes donde el agua puede escaparse a zonas más profundas inaccesibles para las raíces de las plantas.

Asimismo, la importancia del suelo viene dada por las múltiples funciones que otorga como:

- Productor de biomasa: proporciona alimentos ya que sirve de anclaje para las raíces de las plantas, biocombustibles, masas forestales, materias primas, etc.
- Actúa como filtro, contribuyendo a otorgarle buena calidad a las aguas.

- Participa en los ciclos hidrológicos, siendo capaz de almacenar y transferir sustancias líquidas, así como la evaporación gracias a absorber la radiación solar.
- Fija gases que participan en el efecto invernadero y en procesos bioquímicos.
- Actúa como reserva de la biodiversidad por el aporte de hábitats y soporte de organismos (Porta Casanellas et al., 2011).
- Es patrimonio físico y cultural: Preserva y conserva propiedades históricas enterradas, que son condicionadas por la calidad del suelo (Kibblewhite et al. 2015).

La importancia de su conservación viene dada por ser un bien fundamental para el desarrollo de la vida, que tarda en formarse cientos o incluso miles de años, mientras que puede ser destruido en cuestión de minutos. Por ello, se considera un recurso no renovable a escala temporal humana (Goyas et al., 2016). Para mantener la calidad del suelo se deben conservar sus propiedades físicas, químicas y biológicas, protegiéndolo además de contaminantes y agentes patógenos (Cruzet al., 2004).

1.2. Causas de la degradación de los suelos y factores que contribuyen a mantener su salud

La degradación del suelo se basa en la pérdida de sus funciones, ocasionando la disminución de los servicios ecosistémicos que aporta, causando además, problemas en la sedimentación, cambio climático, cambios en las cuencas hidrográficas y en los hábitats y ecosistemas, perturbando la biodiversidad (Jie, et al., 2002).

La degradación puede ser propiciada por causas naturales o por la acción antrópica:

- Mediante la acción de la naturaleza, se pueden clasificar como físicas, químicas y biológicas. Las físicas engloban a la degradación por compactación, erosión y sedimentación, las biológicas por la disminución de materia orgánica y decrecimiento en la actividad biológica y finalmente, la química, por la disminución de nutrientes en el suelo, reducción de pH y presencia de sustancias tóxicas.
- Por las actividades humanas o también llamadas antrópicas, se produce como consecuencia de la deforestación, cultivo intensivo, abuso de productos químicos, construcción en áreas de protección (Lal y Stewart, 1990), pastoreo excesivo, sobreexplotación de acuíferos, la no rotación de cultivos, empleo de maquinaria inapropiada, etc (Betancourt y Pulido, 2006).



Por consiguiente, estos aspectos son los responsables de propiciar la erosión por eliminación de cobertura vegetal, alteración hídrica y esquilma de nutrientes, amenazando severamente a la fertilidad de los suelos. La mayoría de ellos provocan daños irreversibles en cuanto a su fertilidad y producción, siendo especialmente sensibles los suelos agrícolas, ya que su productividad depende en buena medida de la salud de este. Para estos suelos, se prevé una disminución del 12% de la productividad en los próximos 25 años, agravándose este problema a nivel mundial donde la quinta parte del suelo se está perdiendo, aumentando en 12 millones de hectáreas de tierra por año, según las Naciones Unidas (Volkan, 2021).

Para poder reducir los daños que se ocasionan se pueden emplear buenas técnicas que contribuyan a mantener una adecuada salud del suelo: poner en práctica la rotación de cultivos, emplear sistemas que ayudan al drenaje del agua evitando el encharcamiento, establecer protecciones contra el viento que facilita la erosión, mantener la cobertura vegetal del suelo, etc., siendo también de vital importancia mantener y conservar una cantidad de nutrientes necesarios en él, consiguiéndose mediante el empleo de fertilizantes (González, 2015) y enmiendas.

Los fertilizantes pueden estar compuestos por materiales inorgánicos u orgánicos de diferentes orígenes, cuyo fin es aplicarlos para reemplazar la pérdida de nutrientes del suelo. Existen dos grandes grupos que engloban a varios tipos de fertilizantes: los fertilizantes orgánicos que son subproductos de origen animal y vegetal, de diversa procedencia, caracterizados por tener baja concentración de nutrientes, por lo que hay que suministrarlos en grandes cantidades y los inorgánicos, siendo estos de origen industrial, pudiendo adaptar su composición química a las necesidades que se requieran, pero no mejoran las características físicas del suelo como los orgánicos (Henríquez et al., 2008) y su alto aporte de nutrientes como nitrógeno puede provocar la contaminación de las aguas si se aplican en exceso.

Los fertilizantes orgánicos contribuyen a la mejora de estructura del suelo, de la actividad microbiana y regulan la temperatura y la humedad a diferencia de los inorgánicos. Además, es conveniente el uso de fertilizantes orgánicos para evitar generar residuos. Se citan a continuación algunos ejemplos de biofertilizantes:

- Los lodos de depuradora, son empleados para hacer compost, los cuales son capaces de incrementar el rendimiento de los cultivos, incluso más que la fertilización química. En España ya se emplean más del 80% del lodo de las depuradoras en agricultura pero están muy regulados por la ley debido a la alta carga biológica que contienen (López y Sainz, 2011).
- Los purines de cerdo, se caracterizan por ser residuos orgánicos que contienen los macronutrientes primarios y secundarios variando según las peculiaridades de la explotación, como la edad del animal, su alimentación y la limpieza. Tienen un bajo ratio de C/N por lo que las grandes cantidades de nitrógeno que poseen pueden



(Blanco, 2015) causar problemas medioambientales siendo necesario dosificar en dosis óptimas. Otro nutriente abundante en los purines es el fósforo, que es limitante en muchos suelos pero que al igual en exceso, puede lixiviar y llegar a las aguas produciendo eutrofización (Rotecna, 2019).

- El empleo de cenizas de combustión de madera es una buena alternativa como fertilizante orgánico del suelo, ya que estas presentan baja concentración de metales pesados, sin llegar a ser perjudiciales para los suelos y aportan gran cantidad de nutrientes demandados por las plantas, además de elevar el pH por su capacidad encalante.

1.3. Aportación de cenizas como enmienda

Las plantas necesitan diferentes nutrientes en cantidades variables para utilizarlos en su crecimiento (Fierro, 2017). Esta demanda de nutrientes hace que se eliminen del suelo, teniendo que ser reemplazados por fertilizantes completando el ciclo natural de los nutrientes, pudiendo ser aportados como abono mediante el empleo cenizas de combustión de biomasa.

Ceniza como residuo

La combustión de biomasa es una técnica muy eficaz para mejorar su gestión como residuo ya que se reduce su volumen y masa, y se puede obtener energía. Por lo general, las cenizas resultantes son eliminadas mediante la deposición en vertedero, siendo consideradas inservibles, pero a día de hoy se está consiguiendo revalorizar este residuo y conseguir una solución sostenible especialmente pudiendo ser empleadas en el sector agrícola y forestal.

Según la ley 7/2022 de residuos y suelos contaminados, las cenizas procedentes de la combustión de madera no son consideradas como residuo peligroso (código Ler 100101) ya que al someterlas a pruebas experimentales de lixiviación, no se aprecian altas cantidades de metales pesados que excedan los límites legales, ocasionando problemas de fitotoxicidad (Singh y Pandey, 2013).

Proceso de combustión

La biomasa es la principal fuente de energía renovable a nivel mundial ocupando en torno al 15% del suministro energético (Quirantes, 2015) . Dependiendo del tipo de combustión de estas, se generan cenizas con propiedades variables. La combustión directa de biomasa se basa en la quema de restos orgánicos empleados como combustible en una caldera (López y Sainz, 2011). Esta influencia depende de la



temperatura del proceso, incrementando la volatilización de potasio y azufre a mayores temperaturas (Etiegeni y Campbell, 1991) ya que el potasio se volatiliza a los 900°C y el azufre a los 1200°C. El calcio y el potasio en el proceso de combustión se oxidan provocando la presencia de hidróxidos y carbonatos. El resto de nutrientes como el magnesio, aluminio y hierro no varían con la temperatura (Omil, 2007), quedando retenidos incluso hasta el 60% de los que había en los restos orgánicos inicialmente. Gracias a ello, pueden ser transferidos de nuevo al suelo.

Las calderas de biomasa, tanto individuales como comunitarias, están en pleno auge (aumentarán para 2050 en un 33-50%) (López et al., 2017) por ser más sostenibles ambientalmente y económicas frente a las que emplean como combustible una fuente fósil promoviendo una mejora energética (Otero, 2018). A su vez, esto supone producir mayores cantidades de cenizas que de igual forma, se tienen que gestionar adecuadamente.

Composición y características de las cenizas

Las propiedades de las cenizas vienen definidas según el tipo de biomasa empleada y el tipo de combustión realizada.

Por lo general, la composición química de este tipo de cenizas provenientes de la combustión directa de madera y restos vegetales, se encuentra en torno a 0,06% de N, 0,42% de P, 18% de Ca, 0,97% de Mg y 2,27% de K (Demeyer et al, 2001) siendo nutrientes muy beneficiosos enriqueciendo los suelos, mejorando sus propiedades químicas y aumentando el crecimiento vegetal, ya que exceptuando el nitrógeno, las cenizas contienen todos los nutrientes necesarios para el crecimiento de la vegetación. Naylor y Schmidt (1986) determinaron que las cenizas tienen una composición 0:1:3 (N:P:K) siendo una relación baja comparándolo con fertilizantes inorgánicos por lo que sería necesario aplicar mayores dosis que un fertilizante convencional.

Las cenizas presentan un fuerte carácter alcalino al encontrarse elementos como óxidos, hidróxidos y carbonatos, lo que permite neutralizar el pH de suelos excesivamente ácidos (Ohno y Erich, 1990). Además, este aumento de pH inmoviliza e impide la solubilidad del aluminio y manganeso evitando su toxicidad por exceso. Otra propiedad importante de las cenizas es que actúan como estabilizante (Morales, 2015) en el suelo, ya que posee propiedades puzolánicas, mejorando las características mecánicas del mismo, al ponerse en contacto con el agua se hidratan, siendo ventajosas en suelos arenosos ayudando a disminuir el exceso de porosidad. Esto también les otorga otro uso como el estudiado por el ingeniero



Mulalo Doyoyo, que mediante tratamientos químicos orgánicos está obteniendo un material con buenas propiedades transformándose en hormigón (Ecoembes, 2021).

El inconveniente de las cenizas es que pueden contener algunos metales pesados como cadmio y plomo pero en pequeñas cantidades y no tienen por qué resultar tóxicos. El cadmio, al parecerse al zinc y ser muy soluble, puede ser absorbido por las plantas y encontrarse en sus diferentes tejidos. Esto ocurre especialmente en las lechugas pudiendo ocasionarles atrofia y clorosis. Pero las cenizas de combustión de biomasa apenas contienen metales pesados (Bramryd y Frashman, 1995), estos autores añadieron diferentes proporciones de cenizas de madera un suelo cultivado con Pinos en Suecia, determinando la ausencia de metales pesados y la disminución de iones aluminio, como consecuencia de la disminución de acidez.

Utilidad de la ceniza como fertilizante

Tradicionalmente se han utilizado cenizas aplicadas a cultivos hortícolas y frutales, por los beneficios que para este uso se les reconocen:

-Contribuye a eliminar las plagas como babosas y hormigas. Se deben aplicar espolvoreándolas alrededor de la planta en forma circular evitando el paso hacia ella.

-Elimina los hongos de las hojas. Esto se debe a su capacidad de elevar el pH, se frota la ceniza sobre la zona afectada eliminando al hongo.

-Sirve como cicatrizante en ramas fragmentadas, debido a que al mezclarse con agua se genera una pasta que envuelve la zona dañada.

-Su utilidad como abono viene dada por contener nutrientes como calcio, magnesio y fósforo principalmente, no se recomienda abonar el suelo más de dos veces al año (precisamente con 1 Kg de ceniza por m^2), porque como muestra López et al., 2017 quienes comprobaron que con el tiempo, concretamente con una diferencia de un mes, tras añadir cenizas a un suelo, continuó aumentando el pH.

-Es beneficiosa para neutralizar suelos con pH ácido (InfoAgro).

-Rentable para la absorción de contaminantes orgánicos e inorgánicos, ya que presentan un menor coste que los materiales absorbentes. Disminuyen la movilidad de las moléculas del suelo pudiendo retener plaguicidas, herbicidas y metales pesados (Quirantes, 2015), facilitando la limpieza y manejo.

A pesar de todos los beneficios que aportan las cenizas a los suelos, según la Normativa Española (Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos



fertilizantes), aún no están recogidas como materias primas para fertilizar, a pesar de los esfuerzos que se están realizando en este sentido (Agronews, 2016) .

Por contribuir a aclarar los efectos de las cenizas como enmiendas del suelo, se realiza esta investigación, en la que se cultivan dos especies de plantas (*Triticum aestivum* y *Lactuca sativa*) sobre dos suelos diferentes (franco-arcilloso y arenoso), llevándose a cabo la experiencia en un invernadero, alterando las propiedades de los suelos mediante la adición de diferentes dosis de ceniza provenientes de una caldera de biomasa y comparando los resultados con una adición de Ca(OH)_2 y el suelo inalterado.

Se apuesta por una respuesta beneficiosa en los cultivos, mejorando su rendimiento y crecimiento, desencadenado por la aportación de nutrientes y elevación del pH por la aportación de las cenizas en el suelo. De este modo, se determina la dosis más adecuada para que esto ocurra, promoviendo el uso de las cenizas en la agricultura como enmienda ante la degradación.



2. Objetivos

El **objetivo principal** de este estudio es comprobar el beneficio del empleo de cenizas de biomasa para los cultivos, a partir de la adición de las cenizas como abono en dos tipos de suelo, franco-arcilloso y arenoso, a dos especies vegetales, con el fin de revalorizar este residuo y cerrar su ciclo de vida.

Objetivos específicos.

- Determinar los efectos de la aplicación de cenizas en el pH de ambos suelos, concretando la dosis óptima a aplicar según el nivel de acidez del suelo.
- Evaluar el impacto de esta enmienda en la germinación y crecimiento de cultivos usando como bioindicadores semillas de trigo (*Triticum aestivum*) y de lechuga (*Lactuca sativa*).



3. Material y métodos

3.1. Materiales

Este trabajo se ha desarrollado en el laboratorio de Edafología y Química Agrícola y en el invernadero de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia (Universidad de Valladolid, España). Los ensayos experimentales tuvieron una duración de 60 días, en los meses de mayo y junio.

A continuación, se describen los componentes empleados en la experiencia:

3.1.1. Suelos

Se utilizaron dos tipos de suelo con diferentes propiedades físicas y químicas, pero con la característica común de tener un pH ácido. Uno de ellos es un suelo agrícola, procedente de los páramos ácidos del Norte de Palencia, tomado en el municipio de Pino del Río, con pH 5,6 y textura franco-arcillosa (ISSS); el otro es un suelo forestal de arenoso tomado en el Pinar de Antequera, al sur de la ciudad de Valladolid con un pH similar, pero textura arenosa. Ambas muestras de suelo fueron tomadas a una profundidad de 0 a 20 cm y tamizadas a 2 mm.

3.1.2. Cenizas

Las cenizas proceden de la caldera de biomasa (corteza y ramas finas de pino y chopo principalmente) de la industria Tableros Tradema S.L., empresa ubicada en Valladolid, que fabrica tableros de fibras. Una vez en el laboratorio fueron secadas al aire para eliminar el exceso de humedad, ya que se enfrían introduciéndolas en una corriente de agua al salir de la caldera. Posteriormente se tamizaron a 2 mm y se utilizó la fracción menor de este tamaño, que fue homogeneizada con un mortero de vidrio. Este tratamiento previo se realiza con el fin de evitar daños en los operadores, dificultad en su manejo y daños sobre el cultivo provocados por las partículas gruesas (Omil, 2007).

La empresa nos compartió el informe de caracterización de las cenizas, realizado por ECA Grupo Bureau Veritas, en el que se concluye que no es un residuo tóxico ni peligroso. Tomando los datos analíticos de dicho informe, se comprobó que no se alcanzan los valores máximos de metales pesados indicados en el Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes, por lo que son aptas para ser utilizadas con este fin.



3.1.3. Hidróxido cálcico, $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Para comprobar la capacidad encalante (neutralizante de la acidez) de las cenizas, se comparó su efecto con el del aporte de hidróxido cálcico. Se utilizó reactivo de laboratorio con dos finalidades: en primer lugar, para calcular la capacidad encalante de las cenizas, comparando el efecto de la adición de ambos a los suelos ensayados. En segundo lugar, para contrastar el efecto en el crecimiento de los cultivos tras aportar dosis equivalentes para un mismo aumento de pH, lo que permite observar cómo las cenizas influyen en el suelo no solo por el aumento de pH que producen, sino también por la cantidad de nutrientes que aportan.

El hidróxido de calcio es una base débil medianamente soluble en agua (Bolívar), de efecto encalante más rápido que el carbonato cálcico.

3.1.4. Especies vegetales seleccionadas

Para el ensayo, se evaluaron los efectos de las cenizas para dos especies de cultivo, seleccionadas por su rápida germinación y crecimiento, además de su desarrollo en pH óptimos en torno a la neutralidad (Acosta, 2021):

-*Lactuca sativa* (lechuga): Es una planta herbácea de la Familia de las Compuestas que se cultiva como alimento por las grandes hojas que desarrolla. Su tiempo de germinación varía entre 4 y 6 días (Bicho) y su cultivo habitual en torno a 50 o 70 días, llegando en algunos casos a los 30 días desde su germinación.

Se caracteriza por preferir suelos de pH en el intervalo 5,8-7,2 (Ecohortum, 2013) pero tiene altas necesidades hídricas, conviniendo una alta humedad relativa del suelo, por lo que es muy sensible a la escasez de agua (Saavedra, 2017), además, prefiere suelos arenosos-limosos y no soporta altas temperaturas.

-*Triticum aestivum* (Trigo): Del género *Triticum* engloba a los cereales y es de las gramíneas más producidas en el mundo. Esta especie de la Familia de las Poaceae es una gran demandante de nutrientes en el suelo. Su tiempo de germinación es muy breve y varía entre 2 y 3 días (De San Celedonio et al., 2015), requiriendo mayores temperaturas que para su crecimiento, siendo la temperatura ideal para su desarrollo en torno a 10-24°C. Prefiere suelos neutros o alcalinos dada su dificultad de prosperar en suelos ácidos.

3.2. Métodos analíticos

Los análisis realizados tienen como fin mostrar el efecto corrector de las cenizas sobre la acidez del suelo y cuales son las dosis más adecuadas para los cultivos.

3.2.1. Determinación de necesidades de encalado y medida de pH

Para calcular las dosis adecuadas de ceniza, evitando un aumento exagerado de pH, se realizó una prueba previa de *necesidades de encalado*, según los métodos oficiales de análisis de suelos del MAPA (1994), con adición de distintas cantidades de hidróxido cálcico, comprobando el cambio de pH producido en los dos suelos. Para ello, se colocaron en tubos de centrifuga de 50 ml de capacidad 8 g de suelo pesados en una balanza de precisión en miligramos, con 40 ml de agua destilada (o el volumen restante hasta 40 ml finales cuando se añadió disolución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$), adicionando distintas dosis de ceniza o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y mezclando.

Tras 3 días de contacto se midió el valor de pH.

Se utiliza en esta determinación una disolución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ obtenida agitando y decantando 1,5 g por cada litro de agua desionizada; esta disolución se valoró con otra de HCl, a su vez titulada con CaCO_3 , empleando como indicador naranja de metilo. Para el suelo arenoso se diluyó esta disolución para evitar tener que añadir volúmenes muy pequeños.

La medición de pH se realizó con pHmetro (Imagen 1.) previamente calibrado, siguiendo el método potenciométrico de la norma UNE-EN-ISO 103910:2022.



Imagen 1.: Medición del pH de ambos suelos con la adición de diferentes dosis de enmiendas en tubos de centrifuga.

Para ello, se agitaron las muestras durante una hora y se dejó reposar otra hora. Finalmente, se procedió a medir el pH sumergiendo el electrodo en la suspensión recién volteada.

Las muestras preparadas para medir el efecto en el pH del suelo franco-arcilloso fueron 12, desde la muestra 0 (control) a la 7 en las cuales se añadieron diferentes dosis de ceniza y desde la 8 a la 11 de Ca(OH)_2 , también en diferentes dosis según se indica en la Tabla 1.

Tabla 1.: Dosis de ceniza y Ca(OH)_2 añadidas en los tubos de centrífuga con suelo franco-arcilloso para medir el pH resultante.

SUELO FRANCO-ARCILLOSO								
Muestras	0	1	2	3	4	5	6	7
Ceniza (%)	0%	0,5%	1,0%	1,5%	2%	2,5%	3,0%	3,5%
Cantidad de ceniza (g)	0	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28
Muestras	8	9	10	11				
Volumen de Ca(OH)_2 (ml)	1	2	4	6				

Para el suelo arenoso fue similar a la experiencia anterior pero con diferentes dosis de ceniza y de Ca(OH)_2 (expuestas en la Tabla 2.). Este cambio se realizó en base a la idea de que como las arenas tienen menor capacidad de intercambio catiónico que las arcillas (Henríquez et al. 2005), se iba a producir mayor brusquedad en el aumento del pH.

Tabla 2.: Dosis de ceniza añadidas en los tubos de centrífuga con suelo arenoso para medir el pH resultante.

SUELO ARENOSO										
Muestras	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ceniza (%)	0%	0,125%	0,25%	0,5%	0,75%	1%	1,25%	1,5%	1,75%	2%
Cantidad de ceniza (g)	0	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16
Muestras	10	11	12	13	14	15				
Volumen de Ca(OH)_2 diluido (ml)	1	2	3	4	5	6				

3.2.2. Determinación de la humedad higroscópica

Se determinó para las muestras de suelos y cenizas secadas al aire, en muestras de en torno a 5 g, pesadas en una balanza con precisión de mg sobre un vidrio de reloj, esparciendo la muestra sobre él para aumentar la superficie de contacto y disminuir el tiempo de evaporación de la humedad al introducirse a la estufa a 105°C. Se dejaron las muestras durante 3 horas y se realizó de nuevo la pesada.

3.2.3. Capacidad de retención de agua

Se estudió la capacidad de los dos suelos para retener agua, con el fin de ajustar el riego de los cultivos a su contenido de humedad óptimo. Se llevaron a cabo dos ensayos, uno de libre percolación y otro por succión en equipo Eijkelkamp de la caja de arena/caolín para medidas de pF entre 2,3 (0,2 bar) a pF = 2,7 (0,5 bar).

- Percolación: Se rellenó en torno a un cuarto de cilindro de 20 cm de alto y 5 cm de diámetro cubierto con una tela para sujetar el material con cada tipo de suelo, y cenizas, y se dejaron saturar en agua por ascenso capilar durante dos días. Después se dejaron "escurrir" por gravedad.

- Equipo de pF de caja de arena/caolín: El proceso se llevó a cabo también para las 3 muestras, de ambos suelos y cenizas. Se colocaron las muestras en cilindros metálicos tomamuestras de 5 cm de diámetro y altura, llenándose a 2/3 de su capacidad; se saturaron con agua por capilaridad, colocados en placas petri durante dos días (Imagen 2.) y se colocaron en la caja de arena/caolín a una tensión de succión de 33 kPa (1/3 atm, pF = 2,5).



Imagen 2. Muestras del suelo franco-arcilloso, arenoso y las cenizas saturándose en agua.

Para obtener los resultados, se colocó una porción de las muestras, de la zona intermedia de los cilindros, en vidrios de reloj y se pesaron, se secaron en la estufa a 105°C durante 24 horas y volviéndose a pesar se obtuvo su capacidad de retención de agua, por diferencia de peso, refiriendo la humedad sobre suelo seco, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{\text{Suelo saturado (g)} - \text{suelo seco (g)}}{\text{suelo seco (g)}} \times 100 = \frac{\text{Humedad (g)}}{\text{Suelo Seco (g)}} \times 100$$

Ecuación [1]

3.3. Aplicación de las dosis de ceniza e hidróxido cálcico

La experiencia se ajustó al tiempo y materiales disponibles. A la hora de organizar el cultivo y los diferentes procesos a llevar a cabo, se partió de las respuestas que tuvo el suelo a las diferentes adiciones de ceniza sobre el pH.

Para desarrollar la experiencia y comprobar cuál es la adición de ceniza óptima para el crecimiento de los cultivos, se elaboraron diferentes tratamientos donde se mezclaron la misma cantidad de suelo con diferentes adiciones de ceniza.

-Tratamientos para el suelo franco-arcilloso:

De este tipo de suelo, se disponía de 11 kg y en cada alveolo (cavidad donde se agregaron los suelos y se cultivaron las especies) se comprobó una capacidad de 230 g para este suelo por lo que se pudo preparar 48 réplicas para realizar la experiencia. Se realizaron 5 tratamientos, en 4 de ellos se prepararon 10 réplicas y en el último tratamiento 8. A continuación se describen las adiciones de cada tratamiento (Tabla 3.):

- Tratamiento 0, o control: Las muestras de suelo se dispusieron sin ningún tipo de suplemento.

En los tres siguientes tratamientos se vertieron diferentes dosis de ceniza escogidas según la alteración que producían en el pH del suelo, buscando que fuera en torno al óptimo del crecimiento de ambas especies cultivadas.

- Primer tratamiento: 1% de cenizas respecto al total de suelo, con el objetivo de conseguir un pH de 5,94.
- Segundo tratamiento: 2%, para alcanzar un pH de 6,2.
- Tercer tratamiento: 3%, para alcanzar un pH de 6,46.

Tabla 3.: Cantidad de suelo y adiciones para los tratamientos del suelo franco-arcilloso. Pesos en g para el conjunto de réplicas por tratamiento. Equivalencia en t/ha para 20 cm de profundidad y densidad: 1,35 g/cm³.

Tratamientos	Franco-arcilloso				
	0	1	2	3	4 Ca(OH) ₂
Cenizas/ Ca(OH) ₂	0%	1%	2%	3%	0,07%
Suelo (g)	2300	2300	2300	2300	1840
Ceniza (g)	0	23	46	69	1,28
Cenizas / Ca(OH) ₂ (t/ha)	0	27	54	81	1,9
Humedad añadida	15%	15%	15%	15%	15%

El último tratamiento se hizo con Ca(OH)₂ para comparar el efecto en el crecimiento únicamente por elevación del pH frente al de las cenizas, con aporte añadido de nutrientes:

- Cuarto tratamiento: Se trató de conseguir un pH de 6,2 mediante la adición de Ca(OH)₂ en polvo (similar al producido en el tratamiento 2 con cenizas). Partiendo de que para 8 gramos se necesitaron 7,37 ml de Ca(OH)₂ saturado para obtener dicho pH, se calculó la cantidad correspondiente para los 1840 g de suelo totales usados, transformándose en gramos con la concentración real determinada y el peso molecular del hidróxido de calcio (72 mg/mmol).

-Tratamientos para el suelo arenoso:

Para este suelo se preparó el mismo número de tratamientos y réplicas, pero con una cantidad mayor de suelo por alveolo, 305 g, y menores dosis de ceniza e hidróxido cálcico (obteniendo los mismo pH por tratamiento que en el franco-arcilloso), como se indica en la tabla 4.

Tabla 4.: Cantidad de suelo y adiciones para los tratamientos del suelo arenoso. Pesos en g para el conjunto de réplicas por tratamiento. Equivalencia en t/ha para 20 cm de profundidad y densidad: 1,35 g/cm³.

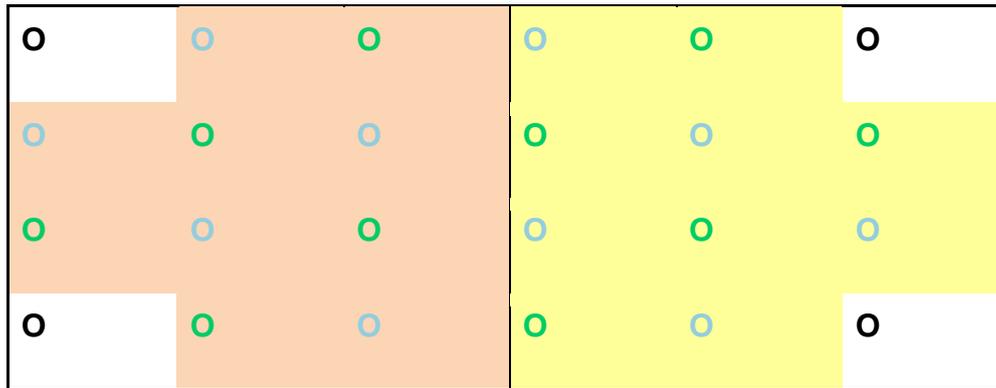
Tratamientos	Arenoso				
	0	1	2	3	4Ca(OH) ₂
Cenizas / Ca(OH)₂	0%	0,1%	0,2%	0,3%	0,02%
Suelo (g)	3050	3050	3050	3050	2440
Adición (g)	0	3,05	6,1	9,15	0,476
Cenizas / Ca(OH)₂ (t/ha)	0	2,7	5,4	8,1	0,53
Humedad añadida	7%	7%	7%	7%	7%

Para conseguir una correcta homogeneidad en los suelos con las diferentes dosis de ceniza e hidróxido cálcico, se realizaron las mezclas con la cantidad total por tratamiento de suelo seco al aire y enmiendas en bolsas de plástico, volteándose con la bolsa cerrada hasta realizar una buena mezcla. A continuación, se añadió una primera cantidad de agua para favorecer la reacción y acondicionar el suelo. Esta cantidad de agua se estimó en base a estudios de la capacidad de retención de agua, añadiendo la mitad de lo establecido, considerándose el 15% de humedad del peso total del suelo franco-arcilloso y 7% en el suelo arenoso. Tras varios días de contacto de las mezclas húmedas con las bolsas semiabiertas, se volvieron a pesar las bolsas para calcular la humedad residual y se dividió el material en los alveolos.

3.4. Diseño experimental del cultivo en invernadero

En los recipientes empleados se encuentran 24 alveolos, que se colocaron sobre unas bandejas de PVC (Anexo 2.) por donde se vertió el agua como modo de riego para que desde la base de cada alveolo, ascendiera el agua por flujo capilar a través del suelo.

Las bandejas se fraccionaron por la mitad para separar cada tratamiento, conteniendo cada bandeja dos tratamientos con 5 plantas de cada especie por tratamiento, del modo recogido en el siguiente esquema:



En los tratamientos se sembraron de manera directa, mitad de *Lactuca sativa* y mitad de *Triticum aestivum*, a 1 cm de profundidad. Las especies fueron distribuidas de forma alterna para que no afectase en la disponibilidad de radiación solar y evitando la competencia, ya que parte de su actividad depende de la capacidad fotosintética. (Baruch y Fisher, 1991).

Una vez rellenado cada alveolo, con su suelo y sembrando una sola semilla, se regó con las dosis de agua óptimas calculadas (18,3% y para el arenoso de 8,52%) según la capacidad de retención de humedad de cada suelo (apartado de resultados). Se añadieron 100 ml más para compensar pérdidas y asegurar la disponibilidad de agua para las semillas.

3.6. Seguimiento de la germinación e inicio del desarrollo

Para observar las diferencias en la germinación y en el inicio del desarrollo de la planta y comprobar cómo les afectan los tratamientos, a los 3 días de la siembra de las semillas, se midió el crecimiento de las plantas a nivel de la superficie del suelo.

3.7. Condiciones de riego



Se regó cada 3 días hasta el porcentaje de la capacidad de retención de agua calculada (50 % de la capacidad máxima de retención. Se determinó la cantidad de agua a aportar como la diferencia de peso de las bandejas respecto al peso inicial.

Las bandejas se colocaron en el invernadero de cristal de la ETSIIAA, en el que a pesar de la regulación de la temperatura por apertura automática de ventanas cenitales, las temperaturas alcanzadas fueron altas, debido a la época del año. Para minimizar el aumento de temperatura, se taparon las bandejas, de color negro, con papel de filtro y fueron regadas con 100 ml más del óptimo calculado, para garantizar la disponibilidad de agua en todos los tratamientos.

3.8. Determinación de biomasa producida

Pasados 45 días de la siembra, se cortaron las plantas desde la superficie del suelo y se pesaron directamente, obteniendo su peso con humedad. Posteriormente, se secaron en una estufa a 50°C hasta peso constante y se pesaron de nuevo para obtener el peso en seco (Anexo 1.).

3.9. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los resultados se llevó a cabo mediante Statgraphics Centurion XIX por el que se estudió cómo afectaron los diferentes tratamientos con enmiendas, el tipo de suelo y las especies cultivadas a su crecimiento.

Se comenzó con un Modelo Lineal General por el que se compara el peso seco de las especies vegetales (variable dependiente) con los diferentes tratamientos (variable independiente). Previamente se estudió la normalidad mediante una prueba de normalidad y la homocedasticidad con el test de Levene de los datos residuales, consiguiéndose mediante un modelo logarítmico de la variable respuesta (peso seco de las plantas).

Se siguió con un ANOVA para observar los efectos producidos entre las variables cuantitativas y se estudiaron las interacciones significativas de las variables por un Modelo Lineal General donde C son cultivos, S son los suelos y T los tratamientos obteniendo el siguiente modelo:

$$\text{Log peso seco (variable dependiente)} = C + S + T + C * S + S * T$$

Ecuación [2]

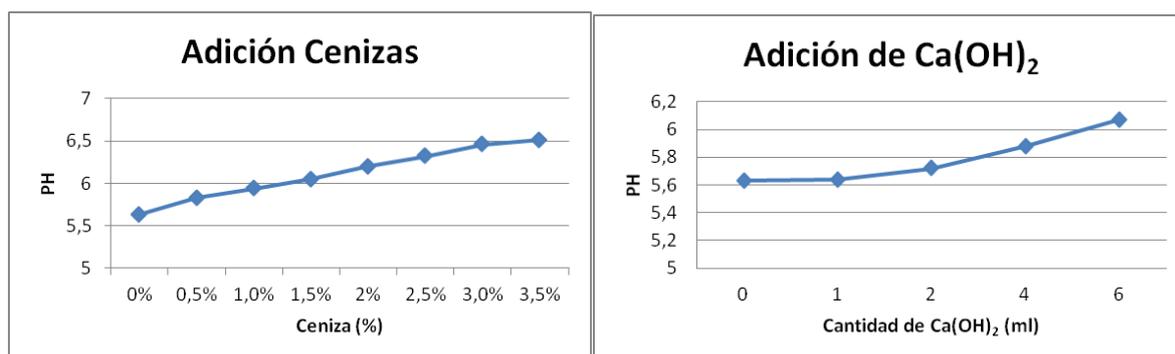
Finalmente, para comparar los niveles de factor de significancia entre los tratamientos, se utilizó el test de Rango Múltiple LSD de Fisher.

4. Resultados y discusión

4.1. Efecto en el pH

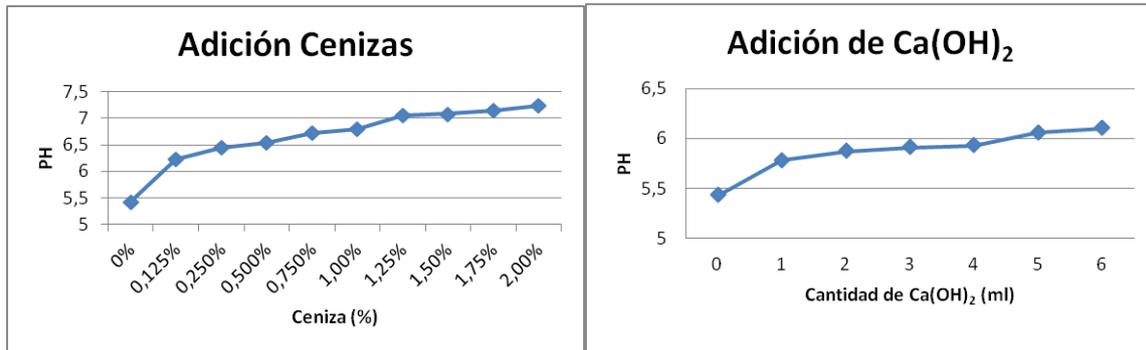
Al ser ambos suelos ácidos, se obtuvo un aumento significativo del pH con el aporte de cenizas y de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ añadida, de forma proporcional a las dosis añadidas. Al aplicar cantidades moderadas de cenizas, se consiguió que aumentará de forma ligera el pH pudiendo realizar los tratamientos de la forma más adecuada para estas especies vegetales.

Para el suelo franco-arcilloso, las dos adiciones, de cenizas y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ provocaron un efecto alcalino (Gráfica 1. y 2.). Esto es causado por los iones hidróxidos. El hidróxido de calcio al disociarse, libera estos iones que son los que provocan el aumento en el pH. Del mismo modo actúan las cenizas, ya que al contener carbonatos, se disocia en sus iones y libera hidróxidos basificando el medio.



Gráfica 1. y 2.: Cantidad de ceniza (%) y dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (ml) añadida en el suelo franco-arcilloso mostrando la evolución del pH.

El suelo arenoso sufrió un rápido aumento del pH (Gráfica 3.) a dosis mucho menores que las utilizadas en el suelo franco-arcilloso, confirmando la previsión de que debido a su menor capacidad de intercambio catiónico, ejerce menor efecto tampón que el otro suelo y el pH se ve más alterado a dosis similares. Del mismo modo, actuó el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Gráfica 4.). Se observa en ambas gráficas un aumento más brusco del pH en la primera dosis para este suelo. También se encuentra que en aportes por encima de 1,25 % de cenizas el pH del suelo superaría el valor de 7, algo que en un suelo tan arenoso puede provocar insolubilización de algunos nutrientes en forma de hidróxidos.



Gráfica 3. y 4. Cantidad de ceniza (%) y dosis de Ca(OH)₂ (ml) añadida en el suelo arenoso mostrando la evolución del pH.

Gilces (2014) utilizando las mismas cenizas también encuentra incrementos significativos de pH en un suelo ácido y otro neutro, pero no en uno básico.

4.2. Humedad higroscópica

Se obtuvo un 2,1% en las cenizas, 5,1% en el suelo franco-arcilloso y 1,2% en el suelo arenoso.

Esto proporciona información sobre la humedad que poseían las muestras inicialmente, conteniendo mayor humedad el suelo franco-arcilloso por sus partículas finas, de mayor superficie relativa y donde se adhiere más fuertemente el agua.

4.3. Capacidad de retención de humedad

Como se muestra en la tabla 5., el suelo franco-arcilloso tuvo una alta capacidad para retener agua y conservar la humedad. Esto se produce por el hecho de que este tipo de suelo contiene poros de pequeño tamaño, aumentando la porosidad y por consiguiente la capacidad de campo, en comparación con el suelo arenoso, además esto hace que presente menor permeabilidad lo que afectó en la práctica en cuanto al tiempo que tardaba en ascender el agua hasta la superficie durante el cultivo.

Las cenizas también presentaron una alta capacidad para retener la humedad (similar al suelo franco arcilloso). Es un material tan fino que absorbe el agua provocando su hinchazón y como consecuencia, disminuyendo el tamaño de los poros. De ahí su empleo para hacer hormigón (Siddique, 2012), por sus propiedades puzolánicas (aglomerante) (Bodí y Doerr, 2012).

Tabla 5. Capacidad de retención de agua (% sobre peso de suelo seco) medido por percolación.

Tipo de suelo	Franco-Arcillos o	Arenos o	Cenizas
Vidrio (g)	21,509	20,130	21,366
Vidrio + suelo (g)	31,859	33,421	33,848
Vidrio + suelo seco (g)	29,085	31,485	30,457
% humedad	36,6%	17,0%	37,3%

Una vez determinada la humedad para cada suelo, se realizó el cálculo de la cantidad a aportar en el riego basándose en la capacidad de retención de agua medida por percolación. La cantidad de agua que se aportó en cada tratamiento se calculó mediante el 50% de la capacidad máxima de retención de agua, siendo el resultado final para el suelo franco-arcilloso de 18,3% y para el arenoso de 8,52%.

En el equipo de pF de caja de arena/caolín el suelo franco-arcilloso también retuvo mayor cantidad de agua (Tabla 6), debido a su composición y porosidad. A diferencia del resultado en la medida por percolación, las cenizas retuvieron menor cantidad de agua que el suelo franco arcilloso.

Tabla 6.: Capacidad de retención de agua (% sobre peso de suelo seco) medido por succión.

Tipo de suelo	Franco-Arcillos o	Arenos o	Cenizas
Vidrio (g)	22,777	22,987	20,122
Vidrio + suelo (g)	33,059	33,586	28,435
Vidrio + suelo seco (g)	31,485	33,206	27,854
% humedad	18,1%	3,7%	7,5%

Esta determinación nos permitió comprobar el comportamiento de cada suelo y de las cenizas ante la pérdida de humedad respecto a la capacidad máxima de retención de agua.

4.4. Germinación de las especies vegetales

La altura (en cm) de las plantas a los 3 días tras la siembra, con la mayor parte de semillas germinadas se muestran en las tablas 7. para el suelo franco-arcilloso y 8. para el suelo arenoso:

Tabla 7.: Crecimiento inicial observado de los cultivos para el suelo franco-arcilloso.

Suelo Franco-Arcilloso					
Especie / Tratamiento	0	1	2	3	4
<i>Lactuca sativa</i> (cm de crecimiento)	0,3	2,5	2,5	1,7	1,4
	0	2,5	0	2,1	1,9
	0,05	2,5	2,4	0	1,5
	1,6	0,5	1,4	0	0
	2,2	2,4	2,4	1,7	-
	2	0,6	0,8	0,2	0,2
<i>Triticum aestivum</i> (cm de crecimiento)	1,5	1,6	1	1	0,8
	0,8	0,7	0,5	1	0,05
	1,7	1,8	0,7	1,3	0
	1,8	0,3	1	0,5	-

Tabla 8.: Crecimiento inicial observado de los cultivos para el suelo arenoso.

Suelo Arenoso					
Especie / Tratamiento	0	1	2	3	4
<i>Lactuca sativa</i> (cm de crecimiento)	2	2,3	0	1,5	1,8
	2,1	1,8	0,8	1,5	2
	1	2	2,2	2,4	0,8
	1	2,1	2,3	0,6	0
	2,5	1,6	2,8	0	-
<i>Triticum aestivum</i> (cm de crecimiento)	1,2	0,8	1	1,2	1
	1	0,2	0,3	1,2	1,5
	1,8	1,4	1,6	0,7	0,3
	1,7	1,1	0,3	0,2	1,4
	1,5	0,1	1,5	1	-

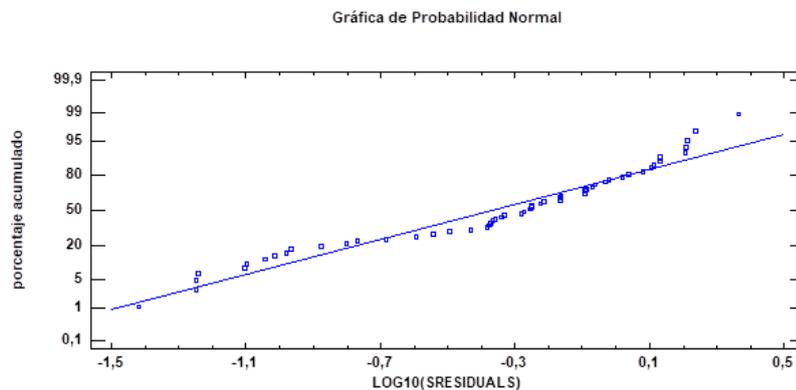
No se apreciaron diferencias significativas en cuanto a la germinación de las especies. Lo que sí llamó la atención fue que varias semillas, todas ellas de *Lactuca sativa*, no germinaron en los siguientes días. El motivo puede deberse a un mal estado de las semillas o la falta de humedad en ese alveolo. De todas formas, se rechazó la hipótesis de que pudieran causar estas dosis de ceniza efecto fitotóxico dado que germinaron el 91% de las semillas sembradas.

Las semillas que no crecieron se sembraron de nuevo, germinando a los 6 días. Esta pequeña diferencia de tiempo no supuso alteración en los resultados finales.

4.5. Crecimiento vegetal

Se realizó un análisis estadístico de los resultados, probandose en primer lugar si los residuales del modelo para la variable respuesta (peso seco de las especies

vegetales) seguían una distribución normal. Dado que no cumplía este requisito, se descartó primero un valor de peso muy alto en el tratamiento 2 de cenizas en una muestra de lechuga; aún así se tuvo que realizar la transformación logarítmica de la variable, comprobándose que de esta forma sí se cumplía la condición de normalidad, como refleja el gráfico de probabilidad normal (Gráfica 5.) .



Gráfica 5.: Prueba de normalidad de los residuos de la variable respuesta.

A continuación, se estudió la homocedasticidad de los residuales de la misma variable respuesta obteniéndose un p-valor de 0,5371; al ser $>0,05$ se confirma que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95% de confianza.

También se estudiaron los residuos atípicos, encontrando 6 valores, los cuales se examinaron para ver si causaban algún efecto al modelo. Para identificar estos valores atípicos se realizó otra prueba de normalidad con el test de Shapiro-Wilk obteniendo un p-valor de 0,1817, determinando que no influyen en el proceso.

Para comprobar si las variables explicativas (cultivo: lechuga o trigo), tipo de suelo (franco-arcilloso o arenoso) y tratamientos (las diferentes dosis de enmiendas) influyen en la variable respuesta, se realizó un ANOVA, obteniéndose un p-valor $< 0,05$ estableciendo que las variables tienen influencia con un nivel de confianza del 95%.

Para probar la significancia de la contribución de cada factor (variables explicativas) se realiza una tabla ANOVA donde los p-valor prueban esta significancia estadística (Tabla 9.).

Tabla 9.: Efectos e interacciones de las variables determinadas según el p-valor.

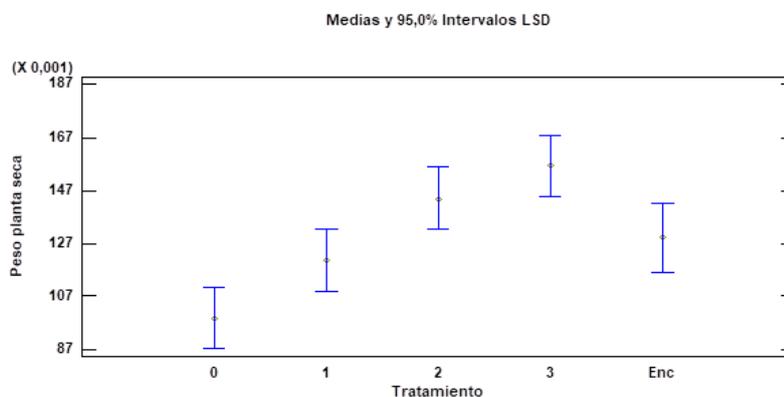
Efecto	P-valor
Efectos principales	
A: Cultivo	0,0823
B: Suelo	0
C:	
Tratamiento	0
Interacciones	
AB	0,002
AC	0,231
BC	0,001
ABC	0,193

Puesto que se encuentran cuatro p-valor $< 0,05$, estos son los que tienen un efecto significativo sobre la variable respuesta con un nivel de confianza del 95%.

Las variables suelo y tratamiento tienen una influencia significativa. La variable cultivo tiene un p-valor $> 0,05$, lo que indicaría que no es estadísticamente significativa sobre la variable respuesta, pero como su interacción con el suelo presenta influencia significativa, habría que diferenciar el efecto del tipo de cultivo (especie) en cada suelo, ya que sería diferente según éste. No se ha considerado importante detallar este aspecto.

La interacción establecida entre suelo y tratamientos, indica que la respuesta de los tratamientos depende del suelo. Se detallará esta influencia más adelante (Gráfica 8).

Para observar qué tratamiento tiene más influencia en la variable respuesta (Gráfica 6.), se realiza a través de un Modelo Lineal General la siguiente gráfica:





Gráfica 6.: Peso (g) de planta seca, según el tratamiento. El punto indica el valor medio y los bigotes el intervalo de mínimas diferencias significativas al 95% de confianza.

Están representadas las medias y los intervalos donde se encuentran los valores del peso seco de las plantas para cada tratamiento. El tratamiento que mayor rendimiento produjo en los cultivos es el tercer tratamiento, el de mayor dosis de cenizas. Además, el tratamiento 2 y el 4 (Enc: Tratamiento con $\text{Ca}(\text{OH})_2$) tenían un pH similar (6,2) siendo de mayor rendimiento aparente el tratamiento 2, con adición de cenizas, lo que significa que podría tener mayor producción no solo por el cambio del pH, si también por otros efectos como podría ser por el aporte de nutrientes. La proporcionalidad en la respuesta observada con la dosis de cenizas parece indicar un efecto de este tipo.

Solla-Gullón et al. (2001) comprueban un aumento en la producción de *Avena sativa* utilizando cenizas del mismo tipo, lo que relacionan con incrementos de las concentraciones de P, Ca y Mg en formas asimilables del suelo y de las concentraciones de Ca y Mg en la planta.

Gilces (2014) encuentra incrementos significativos de P asimilable (método Olsen) en suelos con aporte de las mismas cenizas en dosis de 0,75 y 1,5 %.

A través de una prueba de Rango múltiple se determina qué medias son significativamente diferentes entre ellas (Tabla 10). El asterisco indica los pares donde existe diferencia significativa con un nivel de confianza del 95%, por lo que estos no establecen relación entre esos tratamientos (tabla 11).

Tabla 10.: Contraste entre los tratamientos y sus diferencias, * indica una diferencia significativa..

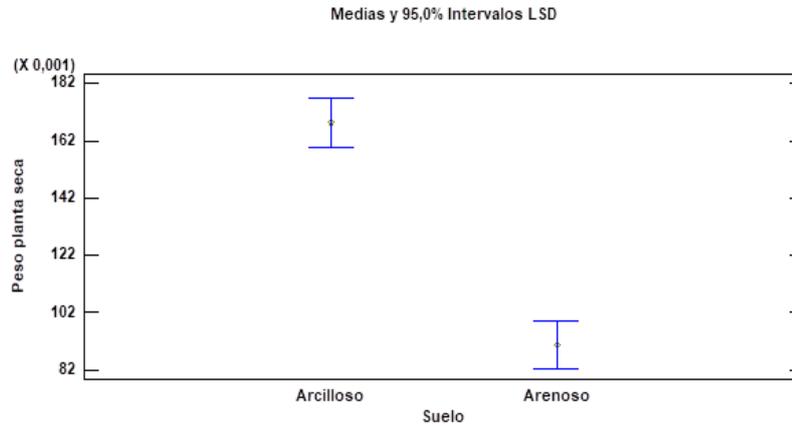
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
0 - 1		-0,0216333	0,0341897
0 - 2	*	-0,0427842	0,0346366
0 - 3	*	-0,05725	0,0341897
0 - Enc(4)		-0,030225	0,0362637
1-2		-0,0211509	0,0346366

1-3	*	-0,0356167	0,0341897
1 - Enc(4)		-0,00859166	0,0362637
2-3		-0,0144658	0,0346366
2 - Enc(4)		0,0125592	0,0366853
3 - Enc(4)		0,027025	0,0362637

Tabla 11.: Similitud entre los tratamientos para ambos suelos.

Tratamiento	Grupos Homogéneos
0	X
1	XX
Enc (4)	XXX
2	XX
3	X

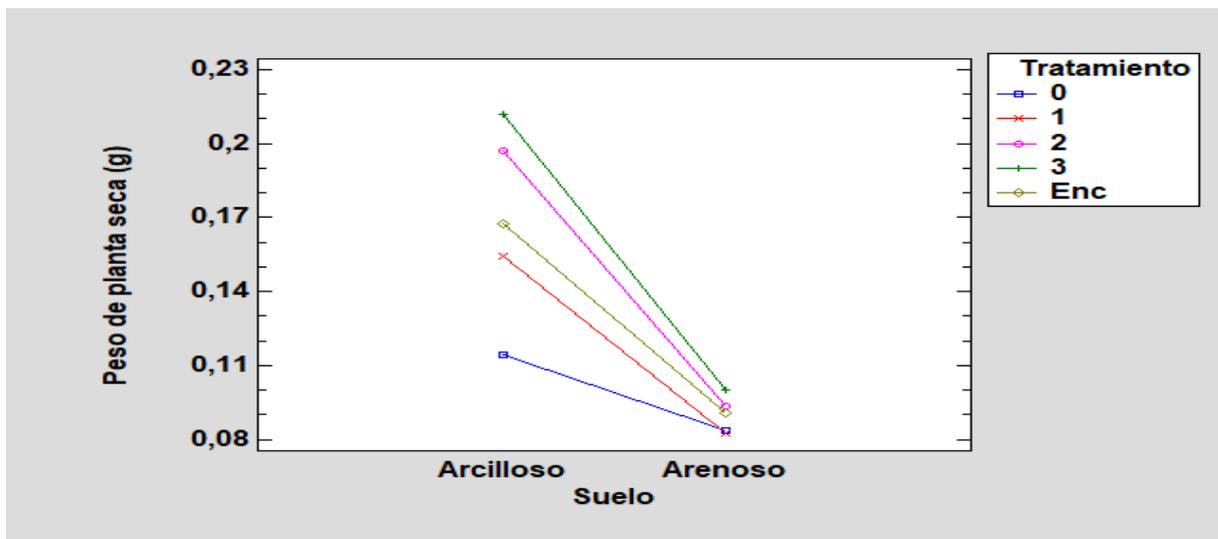
Por otra parte, se estudia el efecto de ambos suelos sobre la variable respuesta, realizándose a través de un Modelo Lineal General. Se estima una diferencia estadísticamente significativa de 0,0771 g de peso seco entre los suelos, con un nivel de confianza del 95%. Para observar la influencia que tienen sobre el crecimiento de las especies vegetales, se realiza la gráfica 7. de medias:



Gráfica 7.: Peso (g) de las especies vegetales secas en relación al tipo de suelo. El punto refleja la media de los valores y los bigotes son los intervalos de crecimiento.

La media del suelo franco-arcilloso se encuentra muy por encima de la del arenoso, lo que significa que las especies vegetales cultivadas en el suelo franco-arcilloso tuvieron un mayor crecimiento respecto al suelo arenoso. Este efecto también podría deberse a un mayor aporte de nutrientes por parte del suelo franco-arcilloso.

En la Gráfica 8 se representan los valores medios de los diferentes tratamientos para cada suelo, lo que permite observar con más detalle el efecto del suelo en la respuesta encontrada. La tendencia fue muy similar en ambos suelos, pero con diferencias más importantes en el franco-arcilloso.



Gráfica 8.: Peso (g) de las especies vegetales secas en relación tratamiento en cada tipo de suelo.



5. Conclusión

A través de esta experiencia se pretendió evaluar la afección real de las cenizas de combustión de biomasa vegetal en suelos con pH ácido, para una especie de gramínea y otra de hortaliza. El experimento fue realizado a escala de invernadero.

Este estudio en sí, promueve la revalorización de las cenizas como residuo a subproducto, asimismo, favorecer su uso desde el punto de vista legal reduciendo su destino a vertedero.

A continuación se mencionan las conclusiones obtenidas de la investigación con el fin de ser de utilidad y mejora del empleo de este residuo en la agricultura:

- Las cenizas empleadas poseen propiedades adecuadas para la fertilización del suelo y bajo riesgo de producir toxicidad, habiéndose comprobado para dosis hasta el 3% de la cantidad de suelo total franco-arcilloso (equivalente a 69 t/ha) y para el arenoso tratado en la experiencia con una dosis de hasta 0,3%, (8,1 t/ha). Se descartó la idea de que las cenizas de combustión de biomasa producen efecto fitotóxico en la germinación de *Triticum aestivum* y *Lactuca sativa*.

- Las cenizas poseen un efecto encalante sobre el suelo, siendo un buen remedio en suelos ácidos y afectados por la degradación por acidificación como la provocada por la lluvia ácida. El pH de los suelos incrementó al aumentar la dosis de ceniza aplicada, teniendo un efecto mayor y más rápido en el suelo de textura arenosa que en el franco-arcilloso.

- La respuesta favorable en la producción inicial de los cultivos estudiados podría deberse además del efecto encalante, al aporte de nutrientes contenidos en las cenizas.



6. Bibliografía

- Acosta, M.B. (2021). *22 plantas que crecen rápido*. Ecología verde. Disponible en: https://www.ecologiaverde.com/22-plantas-que-crecen-rapido-1995.html#anchor_1
- Agronews (2016). *La estruvita, biocarbones y cenizas como fertilizantes*. Consultado 2022. Disponible en: <https://www.agronewscastillayleon.com/la-estruvita-biocarbones-y-cenizas-como-fertilizantes>
- Bicho, A. *Profundidad y tiempo de germinación de las semillas*. La huertina de Toni. Disponible en: <https://www.lahuertinadetoni.es/como-y-cuando-germinan-las-semillas/#:~:text=%E2%80%93%20De%20a%20d%C3%ADas,%2C%20hinojos%2C%20perejil%2C%20salvia>
- Baruch, Z., y Fisher, M. (1991). *Factores climáticos y de competencia que afectan el desarrollo de la planta en el establecimiento de una pastura. Establecimiento y renovación de pasturas*. CIAT. Cali, Colombia, 103-142.
- Blanco, L. (2015). *Análisis y caracterización de purines para la obtención de estruvita y biogás*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Bodí, M. B., y Doerr, M. (2012). *Efectos de las cenizas y la repelencia al agua en la hidrología de suelos afectados por incendios forestales en ecosistemas mediterráneos* (Doctoral dissertation, PhD Thesis, Universidad de Valencia, Valencia).
- Bolívar, G. (2019). *Hidróxido de calcio: estructura, propiedades, obtención, uso*. Lifeder. Disponible en: <https://www.lifeder.com/hidroxido-de-calcio/>
- Bramryd, T., y Fransman, B. O. (1995). *Silvicultural use of wood ashes—effects on the nutrient and heavy metal balance in a pine (Pinus sylvestris, L) forest soil*. Water, Air, and Soil Pollution, 85(2), 1039-1044.



- Burbano-Orjuela, H. (2016). *El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria*. Revista de Ciencias Agrícolas, 33(2), 117-124.
- Cruz, A. B., Barra, J. E., del Castillo, R. F., y Gutiérrez, C. (2004). *La calidad del suelo y sus indicadores*. Ecosistemas, 13(2).
- Demeyer, A., Nkana, J. V., y Verloo, M. G. (2001). *Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview*. Bioresource technology, 77(3), 287-295.
- De San Celedonio, R. P., Micheloud, J. R., Abeledo, L. G., Miralles, D. J., y Slafer, G. A. (2014). *Riesgo de anegamiento en trigo (Triticum aestivum L) para distintas localidades de la región triguera Argentina*. Ciencia del suelo, 32(2), 233-246.
- Ecoembes. (2021). *Reciclando cenizas industriales para producir hormigón ecológico*.
- Ecohortum. (2013). *Huerto en casa: El pH óptimo del suelo*. Disponible en: <https://ecohortum.com/huerto-en-casa-el-ph-optimo-en-suelo/>
- Etiegni, L. y Campbell, A.G. (1991) *Physical and Chemical Characteristics of Wood Ash*. Bioresource Technology, 37, 173-178
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación).
- Fierro Miguez, S. M. (2017). *Efectos de fertilizantes orgánicos sobre el rendimiento del grano en el cultivo de arroz (Oryza sativa L.)* (Bachelor's thesis, Babahoyo: UTB, 2017).
- García, G. N., y Navarro García, S. (2014). *Fertilizantes: química y acción*. Ediciones Paraninfo, SA.
- García-Ruiz, J. M. (2010). *The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review*. Catena, 81(1), 1-11.



- Gilces, M^a A. (2014). Efectos de la aplicación de biochar y cenizas en las propiedades del suelo. Trabajo fin de máster. Universidad de Valladolid.
- González Toro, Carmen. 2015. *Guía educativa sobre la salud del suelo*. USDA.
- Goyas Céspedes, L., Cabanes Espino, I., y Zambrano Noles, S. P. (2016). *Análisis jurídico del ordenamiento territorial y el uso del suelo como recurso natural insustituible*. *Revista Universidad y Sociedad*, 8(3), 6-12
- Henríquez, C., Castro, A., y Bertsch, F. (2008). *Capacidad de suplemento de nutrientes de los fertilizantes orgánicos*. In XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Universidad Central del Ecuador (p. 1).
- Henríquez, M., Pérez, J., Gascó, J. M., y Rodríguez, O. (2005). *Determinación de la capacidad de intercambio catiónico en arena y caolín usando acetato de amonio, acetato de sodio y cloruro de amonio*. *Bioagro*, 17(1), 59-62.
- InfoAgro. *La ceniza en la agricultura: cómo usarla*. Disponible en: <https://infoagro.com.ar/la-ceniza-en-la-agricultura-como-usarla/>. Recuperado el 02/07/2022.
- Jie, C., Jing-Zhang, C., Man-Zhi, T., y Zi-tong, G. (2002). *Soil degradation: a global problem endangering sustainable development*. *Journal of Geographical Sciences*, 12(2), 243-252.
- Kibblewhite, M., Tóth, G., y Hermann, T. (2015). *Predicting the preservation of cultural artefacts and buried materials in soil*. *Science of the Total Environment*, 529, 249-263.
- Lal, R., y Stewart, B. A. (1990). *Soil degradation: A global threat*. *Advances in soil science*, 2.
- López Mosquera, ME. y Sainz Osés, M.J. (Coords.) (2011). *Guía de residuos orgánicos de uso agrícola*. Santiago de Compostela: Servizo de Publicacións. Universidade de Santiago de Compostela



- López Núñez, R; Burgos, P., Girón, I. F., Corell, M. (2017) *Uso de compost que incluyen cenizas de biomasa para el cultivo de sandía*. En: Reciclando los residuos para mejorar los suelos y el medioambiente. V Jornadas de la Red Española de Compostaje 311-315.
- MAPA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación). (1994). *Métodos oficiales de análisis*. Tomo III. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- Morales Zuluaga, D. (2015). *Valoración de las cenizas de carbón para la estabilización de suelos mediante activación alcalina y su uso en vías no pavimentadas* (Bachelor's thesis, Universidad de Medellín).
- Naylor, L. M., y Schmidt, E. J. (1986). *Agricultural use of wood ash as a fertilizer and liming material*. *Tappi*; (United States), 69(10).
- Nguyen, P., y Pascal, K. D. (1997). *Application of wood ash on forestlands: ecosystem responses and limitations*. In *Proceeding of the Conference on Eastern Hardwoods, Resources, Technologies, and Markets*, Forest Product Society (p. 203).
- Ohno T., Erich, M. S., 1990. *Effect of wood ash application on soil pH and soil test nutrient level*. *Agric. Ecosyst. Environ.* 32, 223-239.
- Omil, B. (2007) *Gestión de cenizas como fertilizante y enmendante de plantaciones jóvenes de Pinus radiata*. Tesis doctoral, Universidad de Santiago de Compostela.
- Otero, L. (2018). *El auge de la biomasa*. Grupo LauraOtero. Disponible en: <http://lauraotero.com/el-auge-de-la-biomasa/>
- Porta Casanellas, J., López Acevedo-Reguerín, M., y Poch Claret, R. M. (2011). *Introducción a la edafología: uso y protección del suelo*. Mundi-Prensa.
- Rodríguez, M. S. A., y Villar, E. M. (1993). *Fertilidad del suelo y parámetros que la definen*. Universidad de la Rioja.



- Rotecna (2019). *Ventajas de la fertilización con purín de cerdo separado mecánicamente*. Disponible en: <https://www.rotecna.com/blog/ventajas-fertilizacion-purin-cerdo/>
- Saavedra, G., Corradini, F., & Antúnez, A. (2017). *Manual de producción de lechuga*.
- Siddique, R. (2012). *Utilization of wood ash in concrete manufacturing*. Resources, Conservation and Recycling, 27-33.
- Singh, J. S., y Pandey, V. C. (2013). *Fly ash application in nutrient poor agriculture soils: impact on methanotrophs population dynamics and paddy yields*. Ecotoxicology and Environmental Safety, 89, 43-51.
- Solla-Gullón, F., Rodríguez-Soalleiro, R., y Merino, A. (2001). *Evaluación del aporte de cenizas de madera como fertilizante de un suelo ácido mediante un ensayo en laboratorio*. Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg, 16(3), 379-393.
- Spark, K. M., y Swift, R. S. (2002). *Effect of soil composition and dissolved organic matter on pesticide sorption*. Science of the Total Environment, 298(1-3), 147-161.
- Steiner, K. G., y Williams, R. (1996). *Causes of soil degradation and development approaches to sustainable soil management* (p. 93). Weikersheim, Germany: Margraf Verlag
- Tian, D., y Niu, S. (2015). *A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition*. Environmental Research Letters, 10(2), 024019.
- Volkan Bozkir, 2021. *El suelo es la solución* . (ONU).
- Zárate, J. B. (1987). *Donde la madera es el combustible*. Revista forestal del Perú, 14(2).

Anexos

Anexo 1.: Especies vegetales cortadas e introducidas en la estufa para su pesado en seco.



Anexo 2.: Evolución de los cultivos desde su germinación hasta el día de corta.





