

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA
FACULTAD DE CIENCIAS**



**“ESTABILIDAD Y CALIDAD DE *BIOCHAR* DE
RESIDUOS AGROFORESTALES DE LA UNALM”**

Presentada por:

ROSARIO NATIVIDAD PALACIOS HUGO

**TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERA AMBIENTAL**

LIMA – PERÚ

2019

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24 - Reglamento de Propiedad Intelectual)**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“ESTABILIDAD Y CALIDAD DE BIOCHAR DE RESIDUOS
AGROFORESTALES DE LA UNALM”**

Presentada por:
Rosario Natividad Palacios Hugo

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERA AMBIENTAL

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Ph. D. Lizardo Visitación Figueroa
PRESIDENTE

Ing. Lawrence Quipuzco Ushñahua
MIEMBRO

Mg. Sc. Armando Aramayo Bazzetti
MIEMBRO

Ph. D. José Luis Calle Maraví
ASESOR

Mg. Quim. Mary Flor Cesare Coral
CO-ASESORA

A mi mamá “Yolita” por ser la pieza clave en este trabajo, así como en todo a mi vida y formación. A mi abuelito Félix López por sus enseñanzas y por guiar mi camino. A mi familia en general, por siempre estar ahí y ser el apoyo que me ha llevado a lo que soy.

AGRADECIMIENTO

Agradezco al Ph. D. José Calle, por darme la oportunidad de realizar la investigación bajo su asesoría, por confiar en mí y en la realización de esta tesis. A Mg. Sc. Maryflor Cesare, por su co-asesoría, su activa participación, ánimo y apoyo en cada ensayo de laboratorio, por todo su entusiasmo en general.

Agradecer al laboratorio de Energías Renovables, Unidad de biomasa energética dirigido por el Ph. D. José Calle, por permitirme realizar la investigación en sus instalaciones. Agradezco a los técnicos de laboratorio, Lic. Ramiro Navarro, Bach. José Chavez y Bach. Angela Castillo, por apoyarme en la parte experimental y por ser grandes amigos durante todo el proceso.

Asimismo, agradezco al Ing. Wilson Castañeda, por sus conocimientos y planteamiento de la tesis, su apoyo constante y apertura para las consultas y seguimiento de la realización de este estudio.

Agradezco al Vicerrectorado de Investigación de la UNALM por el financiamiento a través del concurso Junior - 2018-II, con el proyecto “Caracterización química de biochar producido a partir de residuos verdes y jardines de la UNALM”, el cual fue parte de esta tesis. Agradezco también al Círculo de investigación “Estudios Medioambientales”, bajo la dirección de la Mg. Sc. Maryflor Cesare y el apoyo de Gabriel Martínez.

Agradezco a Dios por darme cada oportunidad de realizar mis sueños y seguir creciendo cada día más. A mi mamá, por enseñarme la perseverancia en cada paso y siempre ser un apoyo increíble, a mi papá por enseñarme a ser fuerte y ayudar a moldear mi carácter, a mi hermanita, por siempre ser la que le pone alegría a mi vida y hacer mis días de descanso más llevaderos; y a mi tía Ruth, por su apoyo y constancia en este camino universitario.

Agradezco a Diego, por apoyarme en concluir esta meta e impulsarme en los meses que más lo necesitaba. Agradezco a mis amigos, Pierinna, por ser la mejor compañera de laboratorio, hacer mis tardes más alegres y hacer las cosas que me limitaba la distancia, a Mariana, Andreita, Alvaro y Dayane por ser los forestalitos que me ayudaron en la parte inicial del proyecto. Agradezco a Diego Wu y Erick por ayudarme a realizar los ensayos. Gracias a todos ellos, porque aun cuando este proceso ha sido largo, siempre han estado ahí para alentarme.

INDICE GENERAL

RESUMEN

ABSTRACT

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LA LITERATURA	3
2.1. <i>Biochar</i>	3
2.1.1. Definición.....	3
2.1.2. Composición.....	3
2.1.3. Beneficios del <i>biochar</i>	4
2.2. Pirólisis.....	6
2.2.1. Definición.....	6
2.2.2. Factores del proceso	6
2.3. Biomasa.....	8
2.3.1. Definición.....	8
2.3.2. Composición.....	8
2.3.3. Proceso de pirólisis	10
2.3.4. Requisitos como materia prima	12
2.4. Biomasa residual de parques y jardines	12
2.5. Biomasa residual de la Universidad Nacional Agraria la Molina	13
2.5.1. <i>Grevillea robusta</i>	14
2.5.2. <i>Schinus Molle</i>	14
2.5.3. <i>Casuarina Robusta</i>	15
2.5.4. <i>Eucalyptus spp</i>	16
2.5.5. <i>Ficus benjamina</i>	17
2.6. Estabilidad del <i>biochar</i>	17
2.6.1. Cinética de mineralización.....	18
2.6.2. Carbono lábil	19
2.6.3. Carbono oxidable soluble (medio)	19

2.6.4.	Carbono recalcitrante (resistente).....	19
2.7.	Fijación de carbono por <i>biochar</i>	19
III.	MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	21
3.1.	Área de estudio.....	21
3.2.	Especies.....	22
3.3.	Preparación de la muestra.....	22
3.4.	Producción de <i>Biochar</i>	25
3.5.	Caracterización de suelo.....	26
3.6.	Evaluación de <i>biochar</i>	27
3.6.1.	Caracterización de <i>biochar</i>	27
3.6.2.	Estabilidad de <i>biochar</i>	32
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
4.1.	Rendimiento de <i>biochar</i>	38
4.2.	Caracterización de <i>biochar</i>	40
4.2.1.	Humedad.....	41
4.2.2.	Carbono orgánico (C _{org}).....	42
4.2.3.	Relación H: C _{org}	44
4.2.4.	Cenizas totales.....	45
4.2.3.	Nitrógeno (N) %.....	46
4.2.4.	pH.....	48
4.2.5.	Conductividad.....	49
4.2.6.	Carbonatos.....	50
4.2.7.	Distribución de partículas.....	51
4.3.	Estabilidad del <i>biochar</i>	53
4.3.3.	Carbono lábil.....	53
4.3.4.	Carbono oxidable.....	55
4.3.5.	Carbono recalcitrante.....	56
4.3.6.	Grado de estabilidad.....	58
4.4.	Respirometría.....	60
4.5.	Comparaciones.....	63
V.	CONCLUSIONES.....	67

VI.	RECOMENDACIONES	68
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	69
VIII.	ANEXOS.....	76

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Tipo de pirólisis.....	7
Cuadro 2: Variación de la composición elemental en función a si la especie es resinosa o no resinosa.....	10
Cuadro 3: Componentes de la biomasa lignocelulósica y sus rangos de descomposición térmica.....	11
Cuadro 4: Número de individuos por especie de la UNALM.....	22
Cuadro 5. Características de individuos o especies seleccionados para el estudio	23
Cuadro 6: Características fisicoquímicas del suelo UNALM	27
Cuadro 7: Los parámetros, criterios y métodos de prueba de la categoría A de prueba. Propiedades Básicas para todo <i>biochar</i>	28
Cuadro 8: Descomposición termina por componente en análisis gravimétrico.	30
Cuadro 9: Análisis estadístico de la variación de rendimiento por temperatura.	39
Cuadro 10: Caracterización en base a los parámetros de la Directriz de IBI (2015).....	40
Cuadro 11. Descomposición del <i>biochar</i>	53
Cuadro 12: Análisis de varianza, regresión lineal de H: C _{org} y GE.....	64
Cuadro 13: Análisis de varianza, regresión lineal de H: C _{org} y AT4.	65
Cuadro 14: Análisis de varianza, regresión lineal de GE y AT4.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Motivaciones para aplicar la tecnología de <i>biochar</i>	4
Figura 2: Hipotética retroalimentación de vegetación - agua del suelo.	5
Figura 3: Sistematización del proceso de pirólisis.	6
Figura 4: Rendimiento de pirólisis por componente de biomasa lignocelulósica.	11
Figura 5: Composición química de la madera según García, M. <i>et al.</i> (2007).	13
Figura 6: Proporción de especies arbóreas de los jardines de la UNALM.	13
Figura 7: Área de estudio, recolección de muestras y análisis de laboratorio.	21
Figura 8: Secado en estufa de muestras.	23
Figura 9: Muestra de <i>Ficus benjamina</i> luego de secado en estufa.	24
Figura 10: Preparación de muestras en recipientes resistentes a la temperatura, para su ingreso a horno pirolítico.	24
Figura 11: Horno pirolítico utilizado para la producción de <i>biochar</i>	25
Figura 12: Ingreso de muestras de biomasa para el proceso de pirólisis.	26
Figura 13: <i>Biochar</i> producido de la biomasa recolectada.	26
Figura 14: Tamizado de <i>biochar</i> en columna de tamices.	27
Figura 15: Instalación de prueba de determinación de carbono inorgánico.	31
Figura 16: Titulación de NaOH luego de adicionado el BaCl ₂	31
Figura 17: Presentación de muestras en la determinación de carbonatos.	32
Figura 18: Agitación de muestras para oxidar el Carbono lábil.	33
Figura 19: Mezclado de extracto de <i>biochar</i> con K ₂ Cr ₂ O ₇	34
Figura 20: Determinación de K ₂ Cr ₂ O ₇ que no ha reaccionado con el carbono soluble.	34
Figura 21: Oxidación de carbono con K ₂ Cr ₇ O ₂ y posterior titulación con tiosulfato ferroso e indicador de difenilamina.	34
Figura 22: Hidrolisis fría con ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄).	35
Figura 23: Hidrolisis con ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) en condensador a reflujo.	36
Figura 24: Muestra luego de mufla a 560°C para determinar las cenizas luego de hallar el carbono recalcitrante.	36
Figura 25: Instalación de prueba de Oxitop para muestras de <i>biochar</i> en estudio.	37
Figura 26: Variación de rendimiento de <i>biochar</i> en función a la temperatura.	38

Figura 27: Interacción de factores de pirólisis en la determinación de Humedad de <i>Biochar</i>	42
Figura 28: Interacción de los factores de Especie y Temperatura en la determinación de Carbono orgánico.....	43
Figura 29: Interacción de factores Especie y Temperatura en la relación H:Corg.....	44
Figura 30: Interacción de Especie y Temperatura en Cenizas	46
Figura 31: Interacción de factores Especie y Temperatura en la determinación de N%	47
Figura 32: Interacción de factores Especie y Temperatura en pH.....	49
Figura 33: Interacción de Especie y Temperatura en Conductividad (dS/m)	50
Figura 34: Interacción de factores Especie y Temperatura en la determinación de Carbonatos.....	51
Figura 35. Distribución de partículas de <i>biochar</i> producido.....	52
Figura 36: Interacción de Especie y Temperatura de Carbono Lábil	55
Figura 37. Interacción de Especie y Temperatura en Carbono Oxidable (%).....	56
Figura 38: Interacción de Especie y Temperatura de Carbono Recalcitrante (%)	58
Figura 39. Interacción de Especie y Temperatura en Grado de Estabilidad (%)	59
Figura 40: AT4 Suelo (Control)	61
Figura 41: AT4 Grevilea 300	61
Figura 42: AT4 Grevilea 500	61
Figura 43: AT4 Molle 300	61
Figura 44: AT4 Molle 500	61
Figura 45: AT4 Casuarina 300	62
Figura 46: AT4 Casuarina 500	62
Figura 47: AT4 Eucalipto 300.....	62
Figura 48: AT4 Eucalipto 500.....	62
Figura 49: AT4 Ficus 300	62
Figura 50: AT4 Ficus 500	62
Figura 51: Interacción de especie y temperatura en AT4	63
Figura 52: Regresión lineal de H: C _{org} y GE	64
Figura 53: Regresión lineal de H: Corg y AT4	65
Figura 54: Regresión lineal de GE y AT4.....	66

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. GUÍA DE RECOLECCIÓN	76
ANEXO 2. HORNO PIROLÍTICO	80
ANEXO 3. PRUEBAS ESTADÍSTICAS.....	81

RESUMEN

La pirólisis, como proceso de descomposición térmica de la materia orgánica, ha ido ganando importancia por permitir el uso de diversos tipos de materia prima y por sus productos (*biochar*, bio-oíl y Syngas), los cuales, además de ser usados como tecnologías alternativas, también significan un manejo sostenible de residuos. En esta investigación, este procedimiento se utilizó como alternativa de manejo de los residuos lignocelulósicos de las podas de jardines de la UNALM, por lo que se seleccionaron las cinco especies forestales predominantes del campus para la producción de *biochar*. El estudio se enfoca en evaluar la calidad y estabilidad del producto analizando la influencia de la temperatura y la especie en producción de *biochar*. Esta investigación concluye que esta enmienda producida es de alta calidad, de acuerdo con las directrices de la *IBI*, por su alto contenido de carbono orgánico y aromaticidad que se genera durante el proceso térmico; además, permite observar la relación directa entre la temperatura y la estabilidad, sin omitir la influencia de la especie, la cual determina las propiedades de carbonatos, nitrógeno, cenizas y humedad.

Palabras clave: *Biochar*, pirólisis, podas agroforestales, estabilidad, caracterización.

ABSTRACT

Pyrolysis, as a process of thermal decomposition of organic matter, has gained importance by allowing the use of various types of raw material and its products (biochar, bio-oil and Syngas), which, in addition to being used as technologies alternatives, also mean sustainable waste management. In this investigation, this procedure was used as an alternative for the management of lignocellulosic residues of the pruning of gardens of the UNALM, so the five predominant forest species of the campus were selected for biochar production. The study focuses on evaluating the quality and stability of the product by analyzing the influence of temperature and species on biochar production. This investigation concludes that this amendment produced is of high quality, in accordance with the IBI guidelines, for its high organic carbon content and aromaticity generated during the thermal process; In addition, it allows observing the direct relationship between temperature and stability, without omitting the influence of the species, which determines the properties of carbonates, nitrogen, ash and moisture.

Keywords: Biochar, pyrolysis, agroforestry pruning, stability, characterization.

I. INTRODUCCIÓN

El gran volumen de residuos lignocelulósicos producidos por la poda de jardines en el campus universitario de la UNALM ha constituido un grave problema por la generación de incendios originados a partir de esta biomasa seca conllevando a multas municipales (La República; 2017), asimismo su mala disposición en el campus ha generado contaminación visual. Ante esto, la producción de *biochar* mediante la pirólisis surge como la mejor opción de reaprovechamiento de estos residuos, el cual es usado como una enmienda para el suelo, valorizándolos y dando cumplimiento a la normativa vigente (Ley de gestión integral de residuos Sólidos D.L 1278) y a la vez, la mitigación de los Gases de efecto invernadero (GEI). Cabe destacar que el *biochar* está siendo utilizado como una alternativa de manejo de residuos sólidos; entre los que cabe destacar parques y jardines, por su alta proporción de biomasa lignocelulósica.

Según Lehmann (2007), el *biochar*, uno de los productos de la pirólisis, es una enmienda enriquecida de carbono deliberadamente utilizado para la mejora de las propiedades físicas del suelo. Se ha demostrado, además, su capacidad de fijar carbono, dado que aseguraría la estabilidad de los residuos en el suelo por largos periodos de tiempo que, según el *International Biochar Initiative* (2015), un 80 por ciento de este duraría más de 100 años.

El estudio de estas propiedades; sin embargo, es variable por las condiciones a las cuales se lleva a cabo la pirólisis y el medio en el cual se pretende utilizar el *biochar*, debido a las interacciones que se tienen con los factores edafoclimáticos.

Por lo tanto, como alternativa de manejo de uso de residuos de parques y jardines de la UNALM, se realizó una investigación que tiene como objetivo principal evaluar la calidad y estabilidad de *biochar* producido a partir de podas de las especies predominantes del campus de la UNALM, y como objetivos secundarios se propuso (i) caracterizar las propiedades básicas del *biochar* en función a los lineamientos establecidos en las “Directrices estandarizadas para la definición y pruebas de productos para el *biochar* utilizado en el suelo”, elaborado por *International Biochar Initiative* (IBI) (ii) evaluar la

influencia de la Temperatura y la Especie en las propiedades del *biochar* producido, y (iii) evaluar la estabilidad del *biochar* producido en suelos del campus en función a estudios de respirométrica e indicadores de grado de estabilidad y relación molecular de H:C_{org}.

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. *Biochar*

2.1.1. Definición

Según Lehmann & Joseph (2009), se puede definir *biochar* como un producto enriquecido de carbono proveniente de biomasa, la cual puede ser madera, hojas o estiércol. Estos pasan por un proceso de pirólisis lenta con temperaturas menores a 700 °C en un ambiente limitado de oxígeno.

Este es un compuesto conocido por ser altamente estable por presentar una estructura aromática; se debe, según lo indicado por Leng & Huang (2018) a la materia prima, y el proceso de pirólisis, dentro del cual se destaca la temperatura del proceso y la duración del tratamiento.

El *biochar* se diferencia del carbón vegetal, principalmente, por el uso que se le asigna, es decir, es empleado deliberadamente como enmienda de suelo para mejorar sus propiedades físicas.

2.1.2. Composición

El *biochar*, según Lehmann & Joseph (2015), está químicamente compuesto por una estructura de 6 carbonos formando anillos aromáticos de manera irregular. Debido a su baja temperatura, generalmente no llega a tener una estructura perfectamente organizada, por lo que se diferencia del grafito. Adicionalmente y dependiendo de la materia prima, puede llegar a contener ciertos minerales.

Además, Leng & Huang (2018) señalan que también está conformado por las cadenas no aromáticas, las cuales, según sus radicales alquil ($-CH_n-$) y carbonilos ($-C(O)-$), también determinará las características de estabilidad de este componente.

2.1.3. Beneficios del *biochar*

Lehmann & Joseph (2009), afirma que el *biochar* es utilizado por cuatro ejes principales, los cuales se encuentran interconectados entre sí, como se puede ver en la Figura 1.



Figura 1: Motivaciones para aplicar la tecnología de biochar.

Fuente: Lehmann & Joseph (2009)

Es decir, la producción de energía más limpia a través del *biochar* es considerada como un combustible ecológico que se logra a través del manejo de residuos y ayuda a mitigar el cambio climático que se logra a través de la fijación del carbono del ambiente en el suelo, dado que su baja tasa de descomposición ayuda que este permanezca en el sistema sin producir gases contaminantes como el CO₂, CH₄, CO y otros.

Para el caso de mejora de suelo; de acuerdo con Prober *et al.* (2014) el *biochar* usa los mecanismos similares a otras enmiendas como lo son el compost, *mulch* y otros; este mecanismo se describe en la Figura 2.

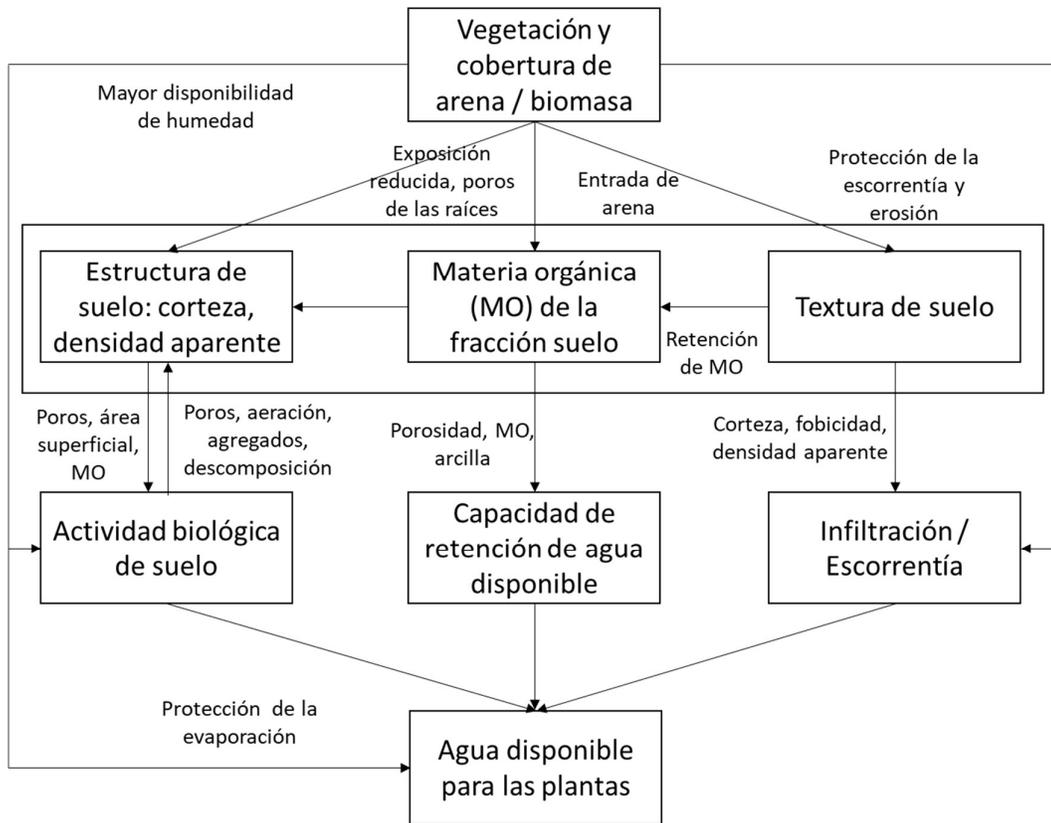


Figura 2: Hipotética retroalimentación de vegetación - agua del suelo.

FUENTE: Prober *et al.* (2014)

En la Figura 2 se desprende que:

- El *biochar* mejora la capa superficial que protege el suelo del impacto de la lluvia, radiación y evaporación, lo que suaviza el suelo.
- La incorporación de los materiales de baja densidad aparente ayuda a que el suelo adquiera una característica similar.
- La mejora en la infiltración ayudaría a reducir la evaporación y reduce la densidad aparente; lo que conlleva a una humedad más alta del suelo.
- Al mejorar la humedad e incrementar el carbono lábil, incrementa la microbiota del suelo.

En base a la relación de C:N que presenta el *biochar*, se puede afirmar que tiene el potencial para facilitar la recuperación de las funciones asociados con el suelo y el agua disponible; sin promover la proliferación de especies exóticas.

2.2. Pirólisis

2.2.1. Definición

La pirólisis es un proceso de descomposición térmica en el cual, mediante el calor, muchos componentes se convierten en estructuras más pequeñas y se volatilizan. Este proceso se da en ausencia de oxígeno u otro oxidante, limitando la oxidación de los componentes (Stauffer, M.; 2013). Es conocido que, durante este proceso, se forma tres productos que se distinguen por diferentes estados, la fase líquida conocida como bio-oil, la fase sólida como *biochar* y la fase gaseosa, Syngas; tal como es descrito en la Figura 3.

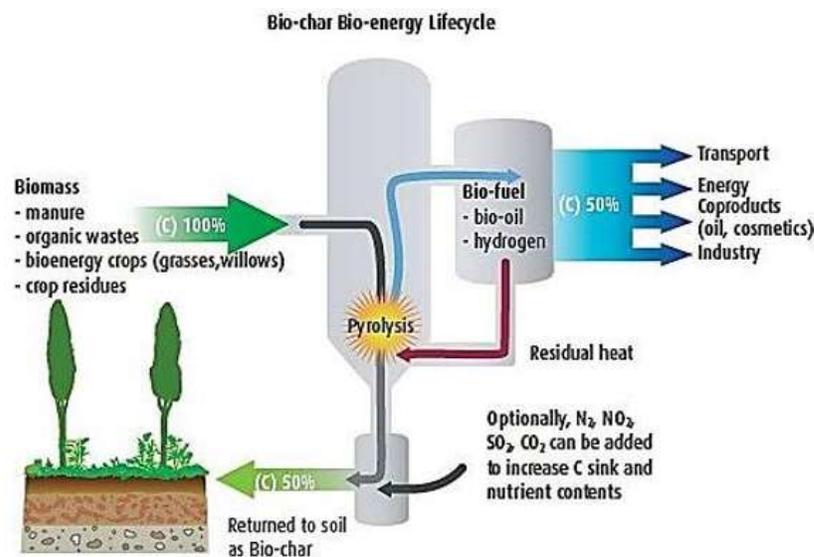


Figura 3: Sistematización del proceso de pirólisis.

FUENTE: Paco, D.; 2012

2.2.2. Factores del proceso

La influencia de los diferentes factores como la temperatura, tiempo de residencia, presión, velocidad de calentamiento y escala determinan la descomposición térmica de la pirólisis. Según lo descrito Mohammad *et al.* (2012), la distribución de las tres fracciones del proceso se da dependiendo del tipo de pirólisis realizada, según se observa en el Cuadro 1, los separa por los factores ya mencionados anteriormente, además del tamaño de partícula; sin embargo, los otros factores no deben de ser desestimados, por lo cual se incluye una descripción de cada uno de estos siguiendo el Cuadro 1.

Cuadro 1: Tipo de pirólisis

Categoría	Temperatura (°C)	Tiempo de residencia	Tamaño de partícula (mm)	Velocidad de calentamiento (°C/min)	Rendimiento de producto		
					Bio-oil	Syngas	Biochar
Lento	~400	Horas-días	5 – 50	0.1-1	25 – 30	25 – 35	30 – 40
Intermedio	~500	5-30 seg.	1 – 50	1.-10	40 – 50	25	25 – 30
Rápido	~500	1-2 seg.	<1	10-200	60 - 75	13 – 20	12 – 20

FUENTE: Mohammad *et al.* (2012).

a. Temperatura

Generalmente, este proceso se lleva a cabo entre temperaturas de 500 a 700 °C; sin embargo, Mohammad *et al.* (2012) reconoce tres niveles de pirólisis: la primera, es considerada una pirólisis lenta (100°C – 300°C); la segunda, pirólisis intermedia (300°C – 500°C) y la tercera, pirólisis rápida (500°C – 700°C). Los productos (sólido, líquido y gaseoso) formados en cada temperatura varían en función a la proporción producida. Las diferencias de la temperatura y el rendimiento porcentual de los tres componentes del proceso se detallan en el Cuadro 1.

b. Tiempo de residencia

Según lo indicado por Zornoza *et al.* (2016), a mayor tiempo de residencia, se estimará una mayor estabilidad, dado que el tiempo de contacto entre el vapor y la parte sólida generará una mayor depolimeración de la estructura, generando mayor aromaticidad, mientras que a menor tiempo el efecto será menor; sin embargo, Crombie, K. *et al.* (2013) señala que, a una temperatura mayor a 550°C, este factor es desestimado, porque no se observa variación en las propiedades químicas.

c. Velocidad de calentamiento

La velocidad de calentamiento afecta inversamente al rendimiento de *biochar*, es decir, a velocidad más lenta (menores a 24°C/min) se esperaría un mayor rendimiento. En el caso que la velocidad sea mucho más rápida (aproximadamente 62°C/min) se esperaría menor rendimiento y también menor estabilidad, dado que la aromatización del producto se da de forma abrupta. (Lehmann & Joseph; 2015).

d. Presión

La presión actúa como factor determinante al generar que la descomposición térmica sea más intensa, según lo señalado por Lehmann & Joseph (2015); sin embargo, al retener el vapor separado, genera un mayor tiempo de residencia con la parte sólida, el cual es absorbido, haciendo que la partícula se reestructure sin una pérdida significativa de su tamaño y, a su vez, la estructura sea más estable.

e. Escala

De acuerdo con Mašek *et al.* (2018) se ha demostrado que no existe diferencia significativa entre la producción a escala laboratorio o piloto en relación con la escala industrial; es decir, se demuestra que la producción de *biochar* se puede llevar a una mayor escala usando diferentes tecnologías sin cambios significativos en los parámetros de la calidad de *biochar*.

2.3. Biomasa

2.3.1. Definición

Se entiende por biomasa a la materia orgánica proveniente de plantas o animales, todos los cuales contengan energía derivada del sol, es decir, las plantas fijan carbono a través de la fotosíntesis y a través de la cadena alimenticia esta llega a los animales (Dhyani & Bhaskar; 2019).

En un metaanálisis de los diferentes tipos de *biochar* obtenidos, se destaca el producido a partir de biomasa lignocelulósica como el más estable, dejando atrás al producido de gras y el producido por excrementos animales (Wang *et al.*; 2016). Esta propiedad, según Zhao *et al.* (2013), es determinada por el contenido de lignina, seguido de celulosa y hemicelulosa, en ese orden debidamente; dado que se descompondrá generando una estructura compuesta por anillos aromáticos.

2.3.2. Composición

a. Celulosa

De acuerdo con Dhyani & Bhaskar (2019) la celulosa es una cadena de polisacáridos de D-glocosa, la cual es lineal y estaría compuesta de 20 – 300 monómeros, las cadenas de celulosa están unidas entre ellas a través de puentes de hidrogeno y fuerzas de Van der Walls, formando microfibras. Estas cadenas están entrelazadas formando la pared celular, la que le

daría la forma y la fuerza a esta. Alrededor de estas microfibras se encuentra la hemicelulosa y la lignina; las cuales también se encuentran unidas por puentes de hidrogeno generando una estructura aromática, dándole mayor estabilidad y fuerza a la planta y su estructura.

b. Hemicelulosa

La hemicelulosa es una cadena heteropolisacárido, la cual está compuesta, según lo señalado por Dhyani & Bhaskar (2019), por monómeros como arabinosa, galactosa, glucosa, ácido glucurónico, mamosa y xilosa, los cuales se presentan como cadenas de xilema, glucoroxilema, arabinoxila, glucomanoma y xyloglucano. Estos polisacáridos están compuestos 50 a 200 monómeros y, a diferencia de la celulosa, la hemicelulosa presenta una estructura amorfa y es la segunda más abundante luego de la celulosa; siendo este uno de los compuestos más fácilmente hidrolizables.

c. Lignina

La lignina es un polisacárido tridimensional compuesto por polifenoles, los cuales se encuentran unidos por alquil – aril, puentes de éter. Estas cadenas están unidas entre ellas a través de puentes éter y éster o carbono – carbono. La lignina ocupa los espacios dejados por la celulosa y hemicelulosa, siendo esta la que les da rigidez a los compuestos en general. La madera y otros compuestos lignocelulósicos contienen lignina entre un 20 por ciento – 35 por ciento (Dhyani & Bhaskar; 2019)

d. Compuestos extraíbles

Los compuestos extraíbles se encuentran de manera natural entre los espacios dejados por los tres componentes mencionados anteriormente. Los metabolitos primarios estarían compuestos por aminoácidos, ácidos carboxílicos, grasas simples, azúcares simples, entre otros y los metabolitos secundarios serían fenoles, flavonoides, alcaloides, monoterpenos y otros. Estos compuestos estarían reportados en la biomasa con un porcentaje inferior a 10 por ciento de la composición y depende de la composición de la especie. (Dhyani & Bhaskar; 2019)

Se señala que la composición resinosa de la biomasa influye en su composición elemental y en su potencial energético; según Arola, R. (1976), citado por Brito & Barrichelo (1978), quien hizo un análisis de la composición elemental de diferentes tipos de madera, obteniendo una diferencia significativa entre elementos con contenido de resina y entre la madera y las hojas; los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2: Variación de la composición elemental en función a si la especie es resinosa o no resinosa.

Tipo	Composición elemental (%)				
	H	C	N	O	S
No resinosas					
Madera	6.4	50.8	0.4	41.8	-
Corteza	6.0	51.2	0.4	37.8	-
Resinosa					
Madera	6.3	52.9	0.1	39.7	-
Corteza	5.9	53.1	0.2	37.9	-

FUENTE: Arola (1976), citado por Brito & George (1978)

e. Cenizas

Está constituida por los minerales que se serían calcio, cloro, manganeso, fosforo, potasio, silicatos, sodio, sulfuros, etc. También elementos trazas como aluminio, cobre, cobalto, hierro, manganeso, molibdeno, níquel, titanio, vanadio y zinc.

2.3.3. Proceso de pirólisis

De acuerdo con Chen *et al.* (2016) durante la pirólisis de biomasa, la pared celular se destruye incrementado el área superficial en contacto con el medio oxidante del suelo, lo que conlleva a que el *biochar* producido a bajas temperaturas presente mayor proporción de carbono oxidable. Dado que la celulosa y hemicelulosa son los primeros en degradarse, generan un carbono amorfo mas no estable; es recién, cuando se da la degradación de la lignina, el momento en el que se genera la estructura estable con el carbono aromático. Esto se puede observar a detalle con la Figura 4, la cual expresa los resultados del proceso de pirólisis por compuesto lignocelulósico.

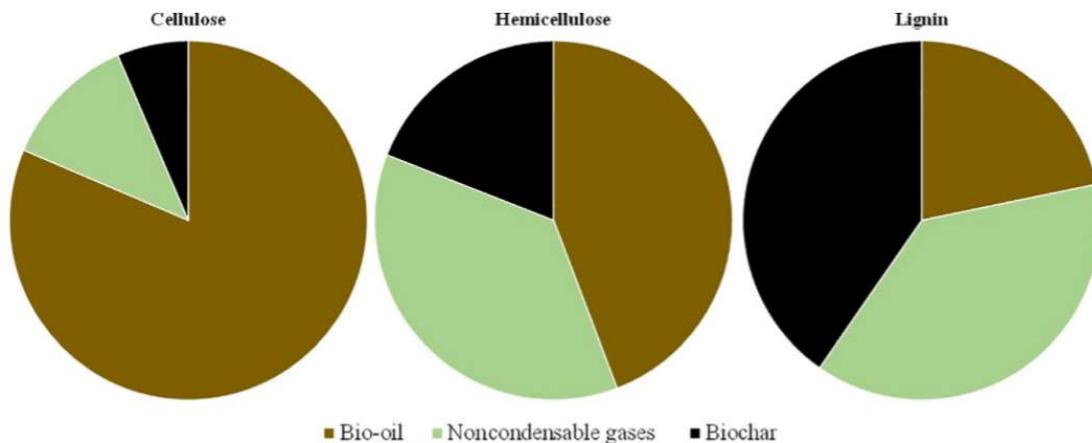


Figura 4: Rendimiento de pirólisis por componente de biomasa lignocelulósica.

FUENTE: Wang *et al.* (2011)

Además, la descomposición de la biomasa presenta diferentes etapas, según Ospina-Guarín *et al.* (2014). La primera está asociada a la humedad (90 °C) y después, a los 200 °C, se inicia la descomposición de celulosa, hemicelulosa y lignina para dar paso a CO, CO₂ y compuestos volátiles, como alcoholes, ácidos, fenoles, entre otros. A los 600 °C la mayor parte del material se ha descompuesto dejando como residuo el carbono fijo, que corresponde a la organización del material carbonoso no volátil, lo que se encuentra a mayor detalle en el Cuadro 3. La presencia de hetero átomos como oxígeno, nitrógeno, azufre, hace que este pueda presentar gran variedad de grupos funcionales.

Cuadro 3: Componentes de la biomasa lignocelulósica y sus rangos de descomposición térmica.

Componente	Temperatura de descomposición (°C)
Agua	>120
Hemicelulosa	200 – 260
Celulosa	240 – 350
Lignina	280 - 500

FUENTE: Ospina-Guarín *et al.* (2014)

De los compuestos mencionados luego del proceso de pirólisis, de acuerdo con Wang *et al.* (2011), los compuestos volátiles se obtienen en mayor medida de la hemicelulosa y lignina, los compuestos de bio-óil se obtiene en mayor medida de la celulosa por su estructura lineal la cual es condensable en el proceso. Finalmente, el *biochar* es formado en mayor medida de lignina, seguido de hemicelulosa y celulosa, puesto que son las estructuras ya complejas en la materia prima, las que continuarían el proceso de aromatización.

Este proceso deja como productos el CO₂, el cual es liberado por la celulosa; el CO por la hemicelulosa y, finalmente, el CH₄ y H₂ por la lignina al volverse más aromática.

2.3.4. Requisitos como materia prima

De acuerdo con las “Directrices estandarizadas para la definición y pruebas de productos para el *biochar* utilizado en el suelo” (IBI, 2015), el material usado para la producción de esta debe de tener ciertas características dado que es el material de origen el que determinará las propiedades que pueda adquirir el producto, es así como las características limitantes son:

- El material original podría ser una combinación de biomasa y diluyentes, cuyo contenido de contaminantes no debe de exceder el 2 por ciento de peso seco de total.
- Cualquier diluyente que constituya más del 10 por ciento de peso seco de la materia prima debe ser reportado como el componente de este, con los requerimientos de diferencias adquiridas durante el proceso de los componentes.
- La materia prima puede ser clasificada en procesada y no procesada, con diferentes requerimientos para el muestreo y análisis del potencial tóxico que pueda adquirir.
- La materia prima que haya sido cultivada en suelos contaminados debe ser considerada como procesada para satisfacer las evaluaciones de toxicología.
- Los residuos municipales que contenga materiales o residuos peligrosos no estarían incluidos en los productos elegibles para la producción de *biochar*.

2.4. Biomasa residual de parques y jardines

Los residuos municipales contienen una gran cantidad de restos lignocelulósicos, los cuales son generados por el cuidado de parques públicos y jardines de cuidado privado. Todo este conjunto contiene una alta proporción de materia orgánica (Grass, podas, hojas, madera, etc.) y una fracción inorgánica (suelo, piedras, etc.). (Czajczyn'ska *et al.*; 2017)

La mayor proporción es constituida por biomasa, además de otros componentes en menor proporción. Por lo que, dependiendo de las proporciones en las que se maneje pueden ser divididas en un grupo de madera suave y madera dura, cuya composición de manera general se encuentra en la Figura 5.

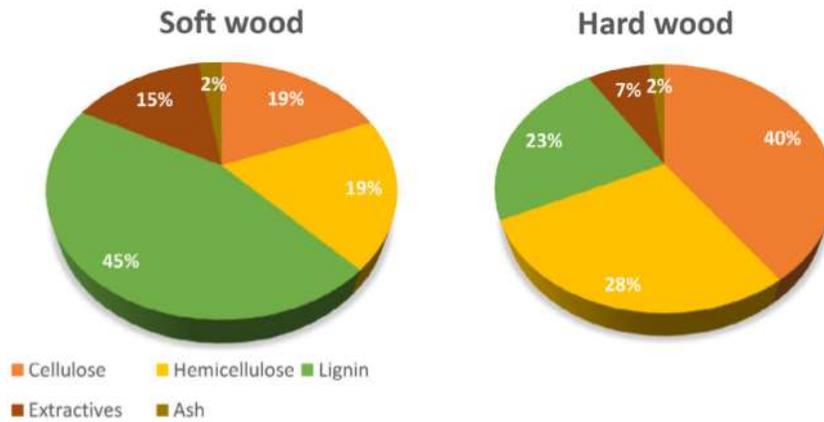


Figura 5: Composición química de la madera según García *et al.* (2007)
 FUENTE: Czajczyn'ska *et al.* (2017)

2.5. Biomasa residual de la Universidad Nacional Agraria la Molina

De acuerdo con Mostiga (2014); quien realizó un inventario de individuos forestales de la UNALM en la cual concluyó con un total 1838; dentro de lo que más resalta la *Grevillea robusta* (Grevilea), *Schinus Molle* (Molle serrano), *Casuarina robusta* (Casuarina), *Ficus benjamina* (Ficus) y *Eucalipto spp* (Eucalipto), las que constituirían las cinco especies más abundantes del campus, así como se muestra en la Figura 6:

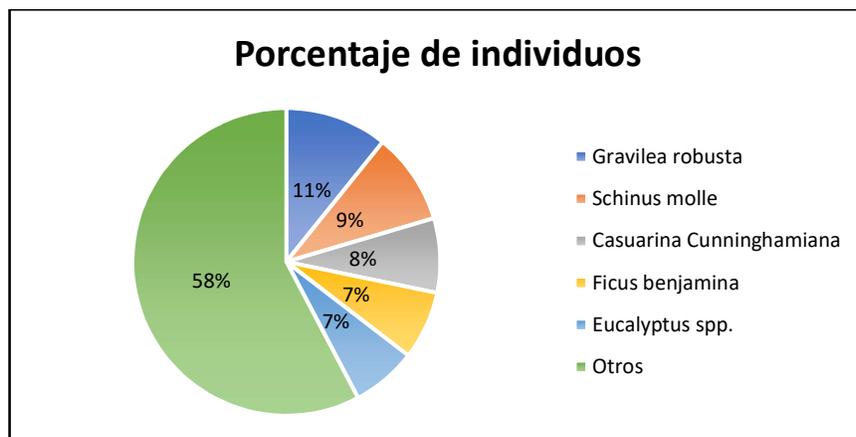


Figura 6: Porcentaje de especies arbóreas de los jardines de la UNALM.
 FUENTE: Mostiga (2014)

2.5.1. *Grevillea robusta*

Familia: Proteaceae

Nombre Botánico: *Grevillea robusta*

Nombre común: Grevilea, roble plateado

Origen: Australia

Árbol ornamental más plantado en el campus de la UNALM, presenta una forma y follaje elegante; de hojas siempre verdes. Su altura máxima alcanzada es de 10 m. Su copa es cónica, alta y delgada. Tronco grueso y recto. Las hojas son de color verde plateado, pinnadas y alfo coriáceas, durante el verano presenta una floración vistosa color amarillo dorado (Mostiga; 2014).

Según Florales (2010) esta es una especie de rápido crecimiento y tolerante a todo tipo de suelos con buen drenaje que, una vez establecido, es resistente a la sequedad. Además, este autor recomienda podas de formación y de copa.

En el campus, Mostiga (2014) investigó la presencia de *Apidiotus merii*. (Escama blanca). Este atacó a todos los individuos dentro del campus, puesto que existe una alta correlación entre la humedad relativa y la proliferación de este; además, los árboles afectados tuvieron en común el déficit de riego, ya que la *Grevilea* requiere un riego frecuente.

Otro insecto que ataca a esta especie es el *Aleurodicus juleikae* (Mosca blanca gigante), aunque presenta una severidad baja, es extendida por todo el periodo de evaluación y se focaliza más en invierno por los factores ya mencionados.

2.5.2. *Schinus Molle*

Familia: Anacardiácea

Nombre Botánico: *Schinus Molle*

Nombre común: Molle Serrano

Origen: Perú, Ecuador y Bolivia

Árbol ornamental de copa redondeada y abundante, siempre verde. De tronco tortuoso y gris que rebrota con facilidad. Es una especie dioica. Sus hojas son verdes, alternas, pinnadas, con folios pequeños. Es una especie resistente a suelos salinos, arenosos o pedregosos. Es

recomendada una poda ligera en el invierno para evitar que las ramas se desgajen (Flolaries, 2010).

Esta es la segunda especie más plantada en el campus de la UNALM, encontrándose ampliamente distribuida. Según Mostiga (2014), la especie es mayormente atacada por *Calophya schini* (Psílido de Molle) presentando altos grados de severidad. Esta especie se asienta tanto en el tronco como en las hojas, ingresando al árbol luego de las podas fuertes que se le da; además, su crecimiento es favorecido por la humedad relativa.

En medicina tradicional peruana; es conocida la especie por su potencial antibacterial, antiséptico tópico, digestivo y purgante diurético, para dolores de muela, cura de reumatismo, ayudar a desordenes menstruales, además de ser un estimulante y antidepresivo (Machado *et al.*; 2009)

2.5.3. *Casuarina Robusta*

Familia: Myrtaceae

Nombre Botánico: *Eucalipto spp.*

Nombre común: Eucalipto

Origen: Australia

Árbol de follaje perenne, dioico, de 10 – 24m. de altura en cultivo, en su lugar de origen puede llegar hasta los 35 m. de copa piramidal cuando el individuo es joven, en épocas de senectud la copa se vuelve irregular y abierta, presenta un tronco recto, con la corteza castaña grisácea, lisa al principio, oscureciéndose y tornándose rugosa con los años, la cual se desprende en tiras longitudinales. Ramillas leñosas, grisáceas, escamosas, sobre las que nacen otras ramillas delgadas y flexibles, verdes, herbáceas, estriadas longitudinalmente, formadas por articulaciones muy cortas y que recuerden a los equisetos y aparentan ser hojas aciculares como en los pinos, teniendo una función asimiladora.

Según Nabil *et al.* (1979) la *Casuarina* contiene trazas de procianidinas, pero tienen una mas alta concentración de ácido elálgico, taninos hidrolizables y ácidos cianídicos. Además, esta es una especie que se puede adaptar ambientes con alta salinidad y poca agua debido a su capacidad de formar micorrizas, Diagne *et al.* (2013) afirma que esta especie llega a fijar nitrógeno en similar medida que lo hace una leguminosa.

2.5.4. *Eucalyptus spp*

Familia: Myrtaceae

Nombre Botánico: *Eucalipto spp.*

Nombre común: Eucalipto

Origen: Australia

Árbol siempre verde de grandes dimensiones, siendo su altura máxima de 20 m dentro del campus. Posee el tronco limpio ya que esta especie se auto poda y una copa columnar, frondosa e irregular. Es valorado por su aroma y aceites; es utilizado en muchas zonas urbanas como cortinas rompe vientos. Esta es una especie de rápido crecimiento por lo que se recomienda una poda de formación. (Floralies, 2010)

Según Mostiga (2014), en el campus universitario, esta especie ha presentado mordeduras en las hojas; sin embargo, al no llegarse a identificar la especie, se asume que se trataría de algún insecto monófago.

Balboa (2005) señala que la copa de los árboles es donde se focaliza los nutrientes absorbidos del suelo, por lo que se vuelve imprescindible el aprovechamiento sostenible de la parte no maderable del recurso. Martínez *et al.* (2006) sostiene que la mayor parte de N y P acumulado por la vegetación se encuentra en las ramas y la corteza que también, acumularían Ca, Mg, y K.

Skolmen & Thomas (1999) sostienen que las hojas de esta especie contienen aceites volátiles que producen un fuego de alta temperatura; sin embargo, su capacidad de regeneración en condiciones normales es bastante elevada, dado que se observa rápidamente brotes en las plantaciones afectadas por incendios a gran escala.

En un análisis de la composición elemental de diferentes especies de Eucalipto, Brito & Barrichelo (1978) señalan que el carbono fijo varía entre 9.6 a 24.3 por ciento, en el cual se determina que la corteza tiene mayor carbono fijo que la madera, lo que proporcionaría un mayor poder calorífico, puesto que, a mayor contenido de carbono, la llama que se formará será de menor envergadura. Por otro lado, se continúa con la relación directa entre el carbono fijo y el material volátil. Se demuestra que, a mayor carbono fijo, se obtendrá mayor porcentaje de cenizas.

2.5.5. *Ficus benjamina*

Familia: Moraceae

Nombre Botánico: *Ficus benjamina*

Nombre común: Ficus

Origen: Asia e India.

Árbol perennifolio, siempre verde, con raíces superficiales, invasoras y aéreas. La altura máxima alcanzada dentro de campus es de 5 m. El tronco segrega un látex gomoso cuando es cortado. Tiene troncos secundarios que comienzan como raíces aéreas y luego se enroscan en el tronco principal. Las hojas son verde intenso, ovadas, coriáceas y lustrosas. En el campus es usada de manera ornamental en las áreas urbanas y como cortina cortavientos cerca a los cultivos agrícolas.

Según Mostiga (2014) no se ha identificado algún insecto que ataque el tronco; pero si las hojas como son la *Aleurodicus juleikae* (Mosca blanca gigante) y *Gynaikoptrips uzeli* (Thrips).

2.6. Estabilidad del *biochar*

De acuerdo con Moreno *et al.* (2008), la estabilidad biológica se entiende como la tasa o grado de descomposición de esta, la cual puede ser expresada como función de la actividad microbiológica.

La medición de la estabilidad de la materia orgánica va de la mano de la descomposición en el suelo de esta, dado que la existencia de un alto contenido de carbono lábil implicaría una alta tasa de mineralización causado por un incremento de la población microbiana, afectando también a la materia orgánica nativa del suelo, dicho fenómeno es descrito como el “*priming effect*”.

La agregación del *biochar* y el mecanismo que conduzca el *priming effect* dependerá de la edad del *biochar* que será añadido. Según lo indicado por Jiang *et al.* (2019), el *biochar* fresco aumenta la cantidad de carbono lábil, el cual es fácilmente captado por los microorganismos, los cuales, a su vez, por disponibilidad de alimento, incrementan su número. Por otro lado, en el estudio presentado, al agregar *biochar* que ya ha sido encubado previamente por 3.5 años, el mecanismo varió dado que el carbono lábil se ha disipado en forma de lixiviados o disuelto en el tiempo de almacenamiento; sin embargo, presenta mayor cantidad de radicales oxígeno por lo que se vuelve más hidrófilo.

Los radicales de oxígeno le permite añadirse al suelo siendo adsorbido por el carbono orgánico del suelo, el cual le da agregación, mayor retención de agua y oxigenación, lo que también hace posible el incremento de la biota; sin embargo, el carbono que se utilizará será el del suelo.

Otros efectos que se produce, es el bloqueo biológico de nitrógeno asimilable del suelo por las poblaciones de microorganismos, dado que se da una competencia del microbiota encargada de descomponer la materia orgánica lábil, produciéndose una fuerte competencia por el N asimilable entre los organismos y la planta. La relación de C/N va relacionado con esta competencia, dado que altos valores de la relación, generalmente indica una mayor inestabilidad del producto.

2.6.1. Cinética de mineralización

Para describir la descomposición de la materia orgánica, Leavitt *et al.* (2006) sostienen que la materia orgánica es una mezcla compleja, dividiéndolas en cinco porciones que pueden ser re-divididas en tres: carbono lábil, carbono medio y carbono recalcitrante. Todos estos se diferenciarían por su tasa de mineralización, su estructura causará que su mayor disponibilidad lo lleve a una temprana degradación. Este autor sustenta la tasa de mineralización en la siguiente ecuación:

$$C_{TCOS} = C_a \cdot e^{-ka \cdot t} + C_s \cdot e^{-ks \cdot t} + C_r \cdot e^{-kr \cdot t}$$

C_{TSOC} : Carbono orgánico del suelo liberado en forma de CO₂ en un tiempo t expresado en días.

C_a : Carbono lábil.

C_s : Carbono medio.

C_r : Carbono resistente.

k : Constante de velocidad de descomposición.

t : Tiempo

ka : Constante de cinética de mineralización de carbono lábil.

ks : Constante de cinética de mineralización de carbono medio.

kr : Constante de cinética de mineralización de carbono recalcitrante.

Este modelo presenta una cinética de primer orden dado que se asume una relación proporcional lineal entre el carbono almacenado en el suelo y las entradas de carbono en el sistema, por lo que su aumento no tendría límite.

Los tres componentes, que se presentan en el modelo, serían descritos como:

2.6.2. Carbono lábil

El carbono lábil es un indicador para evaluar estabilidad oxidativa del *biochar*, debido que al ser el *biochar* esparcido como principal fuente de materia orgánica del suelo, es el que determina realmente el carbono orgánico disponible como nutrientes para los organismos del suelo (Chen *et al.*; 2016). Esta fracción determina el “*priming effect*” del *biochar* en el suelo.

Su disponibilidad disminuye conforme la temperatura se incrementa, debido a que la celulosa y hemicelulosa es degradada entre 300 y 400 °C y la lignina, a temperaturas superiores, pasa a formar la estructura aromática de seis carbonos.

2.6.3. Carbono oxidable soluble (medio)

Según Jackson (1984) el carbono oxidable correspondería a la materia orgánica menos activa pero que, por procesos microbiológicos, pasa a integrarse al suelo en forma de humus. Según Lotzow *et al.* (2006), esta correspondería a la segunda recalcitrancia debido a que necesita ser sintetizada por microorganismos para asegurar su estabilidad en el medio.

2.6.4. Carbono recalcitrante (resistente)

Según Lutzow *et al.* (2006); la recalcitrancia del carbono se debe a los anillos aromáticos, debido a su preservación en la primera parte de la degradación de la materia orgánica, El mecanismo se debería a su naturaleza apolar, la cual hace inaccesible que las enzimas puedan actuar sobre este, lográndose adherir a las partículas de arcillas mediante puentes de hidrogeno para de esta manera estabilizarse.

2.7. Fijación de carbono por *biochar*

La International *Biochar* Initiative (IBI) ha propuesto que el uso de esta tecnología implicaría la reducción de gases de efecto invernadero en un 12 por ciento asumiendo que el 80 por ciento de *biochar* duraría cerca de 100 años, por lo que este organismo promovería la comercialización del producto, pronosticando un secuestro de carbono de 2.2 Gt C/año al 2050.

Sin embargo, es conocido que la mineralización del carbono almacenado en el *biochar* no solo dependerá de las propiedades que se originan durante el proceso de pirólisis, sino también de las condiciones meteorológicas y edáficas del medio. En este caso, basado en el

estudio realizado por Gurwich *et al.* (2013), se llegaría a la conclusión de falta de información sobre la capacidad de almacenar carbono por los pocos estudios realizados. De acuerdo con el estudio basado en publicaciones científicas sobre *biochar*, solo 311 artículos científicos hablarían sobre la estabilidad del *biochar*, de los cuales se tiene que 18 de ellos hablarían de resultados sobre el tema y solo 7 de ellos proveerían de información cuantificable en términos de tiempo de vida, el cual se establecería entre 8 a 3600 años, basando mayormente las asunciones en estudios de laboratorio, donde muchas de las variables en el medio son despreciadas.

Por lo tanto, cabe resaltar que, si bien gran parte de estos estudios son realizados en los trópicos tanto sudamericanos como africanos, la diversidad de condiciones preexistentes no determina la uniformidad ni la validez del tiempo estimado para un punto en específico.

III. MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio

La materia prima utilizada para la producción de *biochar* y el suelo para la prueba de respirometría fueron extraídas del campus universitario, donde además se llevaron a cabo las pruebas en el Laboratorio de Energías Renovables, Unidad de biomasa energética.

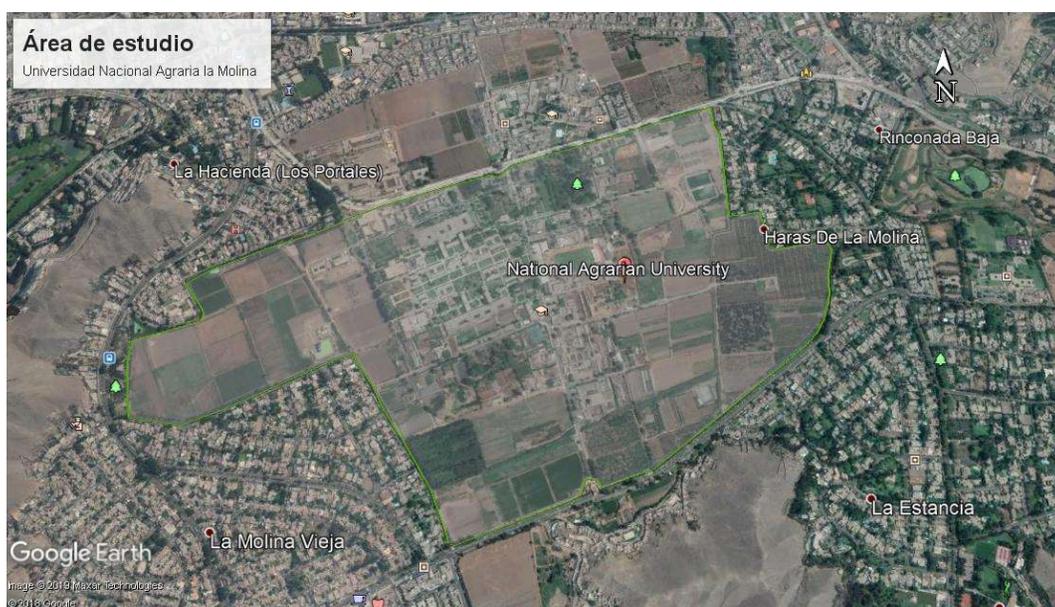


Figura 7: Área de estudio, recolección de muestras y análisis de laboratorio.

Coordenadas geográficas:

Distrito : La Molina.
Provincia : Lima.
Departamento : Lima.
Latitud : 12° 05°S
Longitud : 76° 56 ° O
Altitud : 243.7 m.s.n.m.

3.2.Especies

Se seleccionaron las 5 especies de mayor abundancia en el campus universitario, las cuales, de acuerdo con el estudio de Mostiga (2014), se describen en el Cuadro 4

Cuadro 4: Número de individuos por especie de la UNALM.

Nombre común	Nombre científico	Familia	Número de individuos
Grevilea	<i>Grevillea robusta</i>	Proteaseae	198
Molle serrano	<i>Schinus Molle</i>	Anacardiaceaceae	177
Casuarina	<i>Casuarina Cunninghamiana</i>	Casuarinaceae	144
Ficus	<i>Ficus benjamina</i>	Moraceae	132
Eucalipto	<i>Eucalyptus spp.</i>	Myrtaceae	126
Otros			1061
TOTAL			1838

FUENTE: Mostiga, M. (2014)

Las cinco especies, de acuerdo con la Figura 6; corresponderían al 42 por ciento del total de especies, por lo que teniendo en cuenta que la poda se da de manera general a todos los individuos, se considera a esta como muestra representativa para tener una muestra del total del material de podas a manejar.

3.3.Preparación de la muestra

De cada una de las especies detalladas en el Cuadro 5, se seleccionaron 5 individuos representativos que cumplan los estándares en anexo 1, realizando una poda de caracterización que abarca la mayor parte posible del individuo. Esta poda consistió en la división del dosel del árbol en 8 partes a modo de cuadrantes y una división paralela al suelo, con el fin de podar dos cuadrantes medios opuestos y obtener una muestra representativa.

Cuadro 5. Características de individuos o especies seleccionados para el estudio

Especie	Nombre científico	Ubicación	Fecha de recolección	Fecha de secado
Grevilea	<i>Grevilea Robusta</i>	Frente a BAN y fac. agricola	5/01/2018	5/01/2018
Molle Serrano	<i>Schinus Molle</i>	Paseo peatonal de lab. Ing. Ambiental	5/01/2018	5/01/2018
Casuarina	<i>Casuarina cunninghamiana</i>	Atrás de laboratorio de suelos	5/01/2018	8/01/2018
Eucalipto	<i>Eucalipto citriodora</i>	Entre módulos azul y gris	4/01/2018	8/01/2018
Ficus	<i>Ficus benjamina</i>	Paradero de buses de la UNALM	3/01/2018	5/01/2018

Las muestras se secaron en una estufa a 105°C por 24 horas para eliminar la humedad en exceso de la materia podada y, de esta manera, homogeneizar las muestras para su posterior pirólisis.



Figura 8: Secado en estufa de muestras.



Figura 9: Muestra de *Ficus benjamina* luego de secado en estufa.

Luego del secado en mufla, se procedió a colocar 500 g. de muestra de cada especie en recipientes resistentes a la temperatura de pirólisis, el contacto entre estas en el proceso se evitó cerrándolas con papel aluminio para su ingreso al horno; así también la pérdida de material por caída u otros que pudiesen afectar.



Figura 10: Preparación de muestras en recipientes resistentes a la temperatura, para su ingreso a horno pirolítico.

3.4. Producción de *Biochar*

El proceso de pirólisis se llevó a cabo en un horno pirolítico, cuya forma de ensamblaje se presenta en el anexo 2. Este horno consiste en un quemador de ½ pulgada de GLP, además de una purga de gases y un conducto de la recuperación de gases. Este horno, permite dar calor a través de una del interfaz de dos cámaras, la temperatura final, se obtiene por la medición de un termostato. Las diferentes partes del horno se detallan en la Figura 11.



Figura 11: Horno pirolítico utilizado para la producción de *biochar*. (Diametros de tubería en pulgadas)

El proceso se llevó a cabo a dos temperaturas, 300 °C y 500°C por 5 horas aproximadamente, dos horas de calentamiento y tres horas de pirólisis a la temperatura de estudio; por lo cual está calificada como pirólisis lenta, según lo indicado por Mohammad *et al.* (2012).



Figura 12: Ingreso de muestras de biomasa para el proceso de pirólisis.



Figura 13: *Biochar* producido de la biomasa recolectada.

3.5. Caracterización de suelo

Los suelos de la Molina, de acuerdo con Delgado, L. (2015), son de textura franca arenosa, con pH ligeramente alcalino y salino, bajo contenido de materia orgánica, por lo que se esperaría tener un bajo valor de Capacidad de Intercambio catiónico (CIC). Las propiedades evaluadas, pueden ser revisadas en el Cuadro 6.

Cuadro 6: Características fisicoquímicas del suelo UNALM

Característica	Unidad	Valor
pH (1:1)		7.63
CE (1:1)	dS m ⁻¹	0.3
M.O.	%	1.52
CaCO ₃	%	0.3
CIC	cmol.Kg ⁻¹	9.6
Saturación de bases	%	100

FUENTE: Delgado (2015)

3.6. Evaluación de *biochar*

3.6.1. Caracterización de *biochar*

El *biochar* pasó por un proceso de separación de partículas por su tamaño luego del proceso de pirólisis para evaluar la distribución de estas. Terminado el proceso se dio paso a la uniformización de muestras puesto que según Ameloot *et al.* (2013), el tamaño de partícula determina la interacción con el sustrato y la biota que contendrá.



Figura 14: Tamizado de *biochar* en columna de tamices.

Luego se dio el proceso de caracterización en función a lo establecido por las Directrices del *International Biochar Initiative* (IBI), según lo indicado en el Cuadro 7. Seguido del Cuadro se describe el análisis gravimétrico, elemental y la determinación de carbono inorgánico, por ser ensayos que no se detallan en el Cuadro 7.

Cuadro 7: Los parámetros, criterios y métodos de prueba de la categoría A de prueba. Propiedades Básicas para todo *biochar*.

Parámetro	Criterio	Unidades	Metodología
Humedad	Declaración	% de masa total, base seco	ASTM D1762 – 84 Método de prueba estándar para el análisis químico del carbón. *Por métodos de referencia de ECB, la metodología ha sido reemplazada por el ASTM D7582.
Carbono orgánico (C_{org})	Mínimo de 10% Clase 1 $\geq 60\%$ Clase 2 $\geq 30\%$ Clase 3 $\geq 10\%$	% de masa total, base seca	Análisis elemental por combustión seca y análisis experimental. ASTM D4373 Método de prueba estándar para la determinación rápida del contenido de carbonato de los suelos y disminución del carbono inorgánico por una valoración de los carbonatos con HCl 1N. $C_{org} (\%) = C_{total}(\%) - C_{inorg}(\%)$ *El análisis de carbono total se ha determinado por ASTM D5373 y carbonatos según lo descrito.
H: C_{org}	Máximo 0.7	Ratio molar	Datos de la prueba de carbono orgánico
Cenizas totales	Declaración	% de masa total, base seco	ASTM D1762 – 84 Método de prueba estándar para el análisis químico del carbón. *Por métodos de referencia de ECB, la metodología ha sido reemplazada por el ASTM D7582.

Continuación...

Parámetro	Criterio	Unidades	Metodología
Nitrógeno total	Declaración	% de masa total, base seco	Mismo procedimiento del carbono orgánico.
pH	Declaración	pH	Análisis de pH con dilución de 1:20 de <i>biochar</i> : agua desionizada. Agitar por 90 minutos a 25°C y medir el pH con un medidor calibrado. (Rajovich <i>et al.</i> ; 2011)
Conductividad eléctrica	Declaración	dS/m	Análisis de CE con dilución de 1:20 de <i>biochar</i> : agua desionizada. Agitar por 90 minutos a 25°C y medir la conductividad con un medidor calibrado. (Rajovich <i>et al.</i> ; 2011)
Carbonatos (si el pH es mayor a 7)	Declaración	%CaCO ₃	Valoración potenciométrica de AOAC 955.01 sobre muestras "tal como se recibió" (es decir, húmeda). Use peso seco para calcular porcentaje de CaCO ₃ e informe "por peso de muestra seco".
Distribución de tamaño de partículas	Declaración	% <0.5 mm % 0.5-1 mm % 1-2 mm % 2-4 mm % 4-8 mm % 8-16 mm % 16-25 mm % 25-50 mm % >50 mm	Evaluar el tamizado progresivo con tamices de 50 mm, 25 mm, 16 mm, 8mm, 4mm, 2 mm, 1 mm y 0.5 mm para luego hallar un promedio ponderado de partículas. $D_{mpa} = \left[\left(\frac{A}{100} \cdot 3 \right) + \left(\frac{B}{100} \cdot 1.5 \right) + \left(\frac{C}{100} \cdot 0.75 \right) + \left(\frac{D}{100} \cdot 0.375 \right) + \left(\frac{E}{100} \cdot 0.225 \right) + \left(\frac{F}{100} \cdot 0.1 \right) \right]$

FUENTE: IBI, 2015.

ECB: *European Biochar Certificate*

a. Análisis gravimétrico

El análisis gravimétrico se realizó en el TGA 701 con método de referencia ASTM D7582; el cual consiste en introducir la muestra en pequeños crisoles con un volumen mínimo de 0.8 – 1.2 g. La muestra fue sometida a un incremento de temperatura y a una atmósfera específica, tal como se señala en el Cuadro 8 para que, al perder el peso, la descomponga en humedad, volátil y las cenizas. El carbono fijo es hallado por diferencia. (*LECO corporation; 2014*)

Cuadro 8: Descomposición termina por componente en análisis gravimétrico.

Componente	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Atmósfera
Humedad	25	107	Nitrógeno
Volátil	107	950	Nitrógeno
Cenizas	600	750	Oxígeno

b. Análisis elemental

El análisis elemental determina el porcentaje de Nitrógeno (N), Hidrogeno (H) y Carbono (C). Estos componentes son determinados siguiendo el método de referencia ATSM D5373, el cual especifica el análisis necesario para cada uno de los componentes en el CHN 628. Antes del ingreso de las muestras, se requiere una calibración del equipo con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), fenilamina, 2,5- (bis (5-terc-butil-2-benzo-oxazol-2-il) tiofeno (BBOT) y otros, los cuales serían los compuestos puros para cada uno de los analitos y de esta manera asegurar la fiabilidad del equipo. (*LECO corporation, 2013*)

Ambos análisis anteriormente descritos contribuyen a la caracterización de *biochar*, dado que los datos obtenidos se presentan de acuerdo con lo indicado por las directrices de *International Biochar Initiative* (IBI) descritos en el Cuadro 7.

c. Determinación de carbono inorgánico

Según Singh *et al.* (2017), uno de los métodos más factibles para realizar la determinación de carbono inorgánico, es la descomposición de este en un ácido fuerte; en este caso se

consideró HCl 2M, el cual libera carbonatos que son captados en una base fuerte, la cual es hidróxido de sodio (NaOH) 0.5 M.

Las reacciones que se presentan son como siguen:



La valoración del carbono inorgánico se da de manera indirecta, al titular el hidróxido de sodio que no ha reaccionado. Esta titulación se hace con un ácido fuerte en menor concentración, es decir, ácido Clorhídrico (HCl) 0.2 M. Con el fin de evitar interferencias, se agrega una BaCl₂ en exceso para precipitar el carbonato en forma de carbonato de bario que podría interferir con la medición.



Figura 15: Instalación de prueba de determinación de carbono inorgánico.



Figura 16: Titulación de NaOH luego de adicionado el BaCl₂.



Figura 17: Presentación de muestras en la determinación de carbonatos.

3.6.2. Estabilidad de *biochar*

a. Carbono oxidable soluble (lábil)

De acuerdo con Chen *et al.* (2016), el carbono lábil se mide en función de la oxidación química, haciendo uso del método de la determinación del carbono orgánico oxidado con $K_2Cr_2O_7$ por el método de espectrofotometría.

El método consiste en pesar 150 mg de *biochar* y colocarlos en un vaso de precipitado, al cual se le añade 55 ml de la solución de reacción (0.1 M $K_2Cr_2O_7$ / 11M H_2SO_4) y se mezcla homogéneamente. Luego, la mezcla es calentada a 135 °C usando un baño de aceite por 30 min. Finalmente, la solución de reacción y el *biochar* oxidado es separado por centrifugación y el *biochar* oxidado es lavado dos veces con agua desionizada y secado en un horno a 105°C por 12 horas.

La curva de relación estándar entre la absorbancia y la concentración del $K_2Cr_2O_7$ es medido en función de la diferencia de absorbancia entre la concentración inicial y la calculada. De acuerdo con Mateo (2013), la observancia se mide a 590 nm.

La reacción de oxidación del carbono estaría en función de la ecuación:



La proporción del carbono perdido es la relación del carbono oxidado y el carbono del *biochar*, el cual será representado de la siguiente manera.

$$P_{carbon} = \frac{M_{carbon}}{(150 \times C_{cb})}$$

P_{carbon} = Porcentaje de pérdida de carbon

M_{carbon} = Masa del carbon perdido

C_{cb} = Masa del carbon de biochar



Figura 18: Agitación de muestras para oxidar el Carbono lábil.



Figura 19: Mezclado de extracto de *biochar* con $K_2Cr_2O_7$.



Figura 20: Determinación de $K_2Cr_2O_7$ que no ha reaccionado con el carbono soluble.

b. Carbono orgánico oxidable

El método de Walkley Black, el calor aplicable es menor a la que se suministra por fuentes externas; por lo que se oxida menos materia orgánica que la total, lo cual es considerado una ventaja dado que se oxida la materia orgánica menos activa. (Jackson; 1970)

Se requerirá una muestra de 0.01 g de *biochar*, el cual es oxidado en medio ácido con $K_2Cr_2O_7$, el sobrante es valorado con sulfato ferroso y un indicador de difenilamina.



Figura 21: Oxidación de carbono con $K_2Cr_7O_2$ y posterior titulación con tiosulfato ferroso e indicador de difenilamina.

c. Carbono recalcitrante

El método empleado es el de “Grado de Estabilidad”, el cual es descrito por Lopez *et al.* (2010), el cual consiste en una modificación del método de Klason. Permite determinar lignina en madera y pulpa. Dado que la lignina es altamente insoluble en ácidos minerales, puede ser medido gravimétricamente después de hidrolizar la celulosa y hemicelulosa con ácido sulfúrico.

La determinación del grado de estabilidad consiste en dos hidrólisis con ácido sulfúrico consecutivos. El primero se lleva a cabo con ácido sulfúrico concentrado frío, destruyendo la celulosa y los compuestos carbonados lábiles; la segunda etapa se realiza con ácido sulfúrico diluido a 0.7 N calentado a 350°C, hidrolizando el resto de los polisacáridos, así como la hemicelulosa y las proteínas. El restante es la lignina y las sustancias húmicas, las cuales constituyen la fracción más resistente. Fue pesado para determinar las sustancias más resistentes al proceso.

$$\% \text{Crecalcitante} = \frac{(\text{masa de papel filtro} + \text{residuo}) - (\text{masa de papel filtro vacío})}{\text{masa de muestra seca}} * 100$$



Figura 22: Hidrólisis fría con ácido sulfúrico (H₂SO₄).



Figura 23: Hidrólisis con ácido sulfúrico (H_2SO_4) en condensador a reflujo.



Figura 24: Muestra luego mufla para determinar las cenizas luego de hallar el carbono recalcitrante.

d. Respirométrica

Según Malińska (2016), se menciona el Oxitop como una prueba estandarizada para determinar la degradación o estabilidad del carbono. En este caso, se ha tomado 5 g de *biochar* de cada una de las especies añadiendo 95 g de suelo, esto con el fin de recrear las condiciones de un suelo rico en materia orgánica, estableciendo que sería lo similar a la saturación de carbono (Six *et al.*; 2002).

La prueba consistió en detectar la disminución de oxígeno por la producción de CO₂ la cual es captada por NaOH sólido a modo de trampa de este gas. Esta disminución de presión es captada y traducida en la degradación del *biochar* dado que es la fuente más rica en carbono.



Figura 25: Instalación de prueba de Oxitop para muestras de *biochar* en estudio.

Cabe destacar que la importancia de esta prueba; dado que, en comparación con estimaciones anteriores, esta permite observar la interacción entre los factores abióticos y bióticos; lo que constituye la introducción del *biochar* en el ambiente. (Lehmann & Joseph; 2015; Singh *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2015)

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Rendimiento de *biochar*

El porcentaje rendimiento se detalla en la figura 26. Estos datos se presentan haciendo una relación porcentual de la masa obtenida luego de la pirólisis y la inicial de la materia orgánica. Estadísticamente, se observa una diferencia significativa en la temperatura de producción, es decir, a mayor temperatura de pirólisis se tiene un menor rendimiento, lo que se respalda en los resultados similares obtenidos por Brick & Wisconsin (2010). La diferencia entre ambas temperaturas se presenta en el Cuadro 9, el rendimiento a 300°C en promedio es de 39.03 por ciento mientras que, a 500°C corresponde un valor de 32.55 por ciento, el rendimiento obtenido se encuentra dentro del rango de 30 a 40 por ciento, lo que respalda que se ha llevado un correcto proceso de pirólisis lenta (Mohammad *et al.*; 2012).

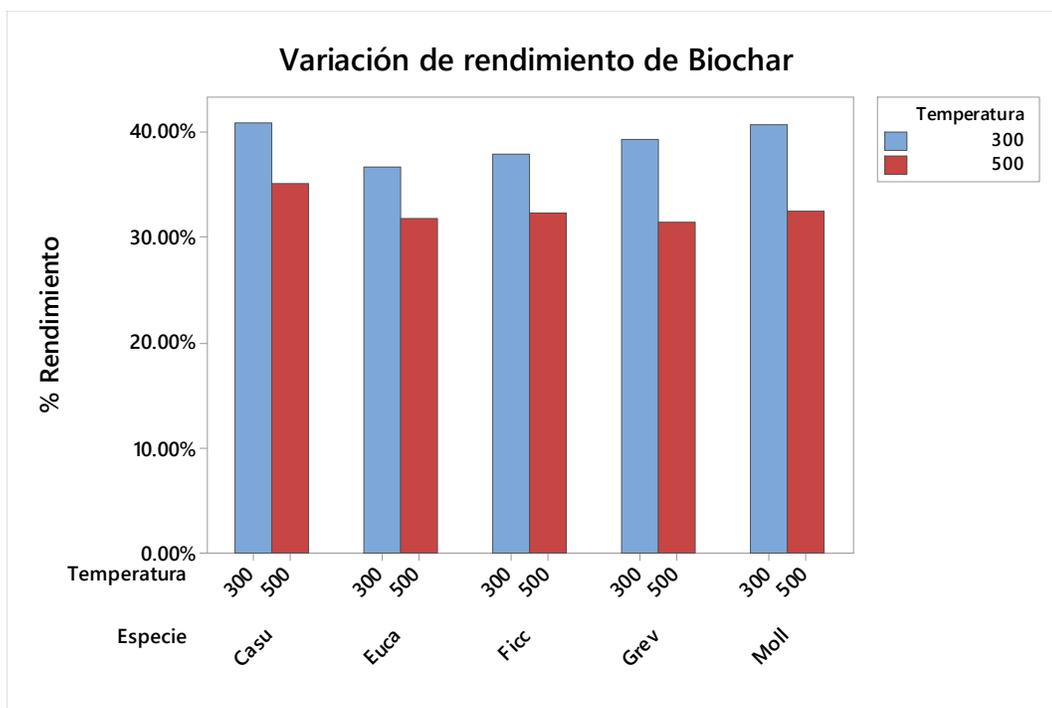


Figura 26: Variación de rendimiento de *biochar* en función a la temperatura.

Cuadro 9: Análisis estadístico de la variación de rendimiento por temperatura.

Temperatura	Promedio	Desviación Estándar	Prueba de Tuckey (0.05)
300	39.028%	0.0183492	A
500	32.548%	0.0139722	B

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

Chen *et al.* (2016) afirman que la variación de rendimiento en función a la temperatura de pirólisis se debe a que, durante el proceso, la pared celular del residuo se destruye para luego dar paso a la destrucción de la celulosa y hemicelulosa, las cuales, por sus estructuras más simple, en comparación a la lignina, se descomponen conforme la temperatura se incrementa; mientras que, en mayor medida, la lignina va formando la estructura más aromática. Además, Zhao *et al.* (2013), afirma que al ser este un residuo lignocelulósico tendrá un rendimiento porcentual alto.

Por otro lado, se observa que el mayor contenido de lignina produce un rendimiento más alto de *biochar*, pero los compuestos volátiles son los que determinan su variación en función a la temperatura (Ospina-Guarín *et al.*; 2014). La Casuarina, la cual presenta un mayor rendimiento a ambas temperaturas; según Saleh & El-Lakany (1979), es considerada una madera dura por su alto contenido de lignina y los compuestos volátiles de esta especie solo constituirían menos del 5 por ciento en comparación a otras especies, por lo que no presenta una variación significativa por la temperatura de pirólisis. En contraste está el caso del Molle, el cual, a pesar de tener un rendimiento similar al de la Casuarina a 300°C, presenta una variación significativa a 500°C, debido a su alto contenido de compuestos fenólicos, los que serían volatilizados fácilmente en el proceso de pirólisis (Machado *et al.*; 2019).

En el caso del Eucalipto y el Ficus, la variación del rendimiento porcentual se debe a que su estructura presenta mayor cantidad de hemicelulosa, por lo que, al elevar la temperatura, la variación de rendimiento se hace más significativa (Rodrigues & Rousset; 2009). De la misma manera ocurre con la Grevilea; dado que en estudios de torrefacción a temperaturas menores a 250 °C ya presenta una variación significativa de rendimiento (Mburu *et al.*; 2008).

4.2. Caracterización de *biochar*

La International *Biochar* Initiative (IBI, 2015) señala que los parámetros para identificar la calidad del *biochar* se da en función a Humedad (%), Carbono orgánico (C_{org}) (%), H: C_{org} (Ratio Molar), Cenizas totales (%), Nitrógeno total (%), pH, CIC (dS/m) y Carbonatos (%), los cuales se presentan en el Cuadro 10. Estas pruebas han sido realizadas con 3 repeticiones por lo que se presenta el promedio y la desviación estándar.

Cuadro 10: Caracterización en base a los parámetros de la Directriz de IBI (2015)

Especie	Humedad (%)	Carbono orgánico (C _{org}) (%)	H: C _{org} (Ratio Molar)	Cenizas totales (%)	Nitrógeno total (%)	pH	CIC (dS/m)	Carbonato (%)
Euca 300	2.86 ±0.09	59.42 ±2.11	0.62 ±0.01	19.36 ±1.14	0.90 ±0.02	9.33 ±0.02	1.27 ±0.03	0.32 ±2.91
Ficc 300	3.44 ±0.04	62.92 ±5.00	0.64 ±0.02	17.60 ±4.33	0.93 ±0.09	9.54 ±0.01	2.26 ±0.02	5.75 ±3.85
Grev 300	3.71 ±0.02	71.61 ±5.12	0.60 ±0.02	10.21 ±4.72	0.77 ±0.40	9.05 ±0.12	2.02 ±0.36	0.07 ±1.30
Casu 300	3.06 ±0.03	63.24 ±3.26	0.56 ±0.02	17.99 ±3.38	1.45 ±0.20	8.26 ±0.04	1.20 ±0.04	1.49 ±1.09
Moll 300	3.47 ±0.02	68.90 ±1.69	0.60 ±0.18	11.89 ±2.47	1.10 ±0.24	9.16 ±0.06	1.42 ±0.05	3.16 ±1.18
Euca 500	3.27 ±0.03	70.80 ±4.80	0.28 ±0.04	16.08 ±5.64	0.69 ±0.02	9.77 ±0.04	1.35 ±0.01	4.66 ±2.13
Ficc 500	3.87 ±0.08	62.46 ±9.70	0.35 ±0.03	25.78 ±7.56	0.71 ±0.04	10.02 ±0.07	2.77 ±0.06	7.24 ±0.28
Grev 500	3.24 ±0.06	79.67 ±7.11	0.30 ±0.00	12.65 ±3.76	0.78 ±0.23	8.60 ±0.01	2.42 ±0.11	4.68 ±3.88
Casu 500	3.37 ±0.01	66.71 ±5.67	0.31 ±0.03	19.17 ±4.05	1.17 ±0.11	9.63 ±0.04	1.31 ±0.02	6.83 ±2.40
Moll 500	4.12 ±0.05	76.42 ±1.62	0.27 ±0.00	12.12 ±0.01	0.99 ±0.02	9.57 ±0.02	2.22 ±0.03	10.65 ±0.74

n = Número de repeticiones por ensayo

n = 3

4.2.1. Humedad

La temperatura del proceso influye en la humedad como se muestra en la Figura 27, esta se incrementa a mayor temperatura de pirólisis debido a que los componentes lignocelulósicos se volatilizan en mayor medida y dejan los espacios que estos ocupaban (Chen *et al.*; 2016).

En este estudio, la humedad de *biochar* producido a 300°C es de 3.308 por ciento; mientras que, a 500°C, es de 3.575 por ciento. Cada una de las especies presenta la tendencia de incremento de humedad a mayor temperatura señalada, exceptuando *Grevilea*, que presenta una tendencia contraria.

Estadísticamente se prueba influencia de “Especie” y “Temperatura” de similar magnitud (Véase Anexo 3, inciso “a”), por lo cual, en relación con la especie, la que presenta mayor Humedad es el Molle 500°C y el menos poroso es el Eucalipto 300°C.

El Molle 500 presenta un mayor contenido de humedad por tener gran cantidad de material volátil en la materia prima, la cual es descompuesta a alta temperatura (Machado *et al.*; 2013). La especie que sigue es *Ficus* 500°C que presenta un comportamiento en correlación con el rendimiento de *biochar* producido, esto se debería a la evaporación de los altos contenidos de hemicelulosa, así como genera un menor rendimiento. También deja más espacio para generar mayor contenido de humedad (Rodrigues & Rousset; 2009). En el caso de la Casuarina, su baja humedad tiene relación con el mínimo contenido de material volátil (Saleh & El-Lakany; 1979).

Por otro lado, *Grevilea* presenta un comportamiento atípico que indicaría una característica higroscópica a mayor temperatura; dado que, asumiendo una gran modificación de su estructura, la alta volatilización durante la pirólisis (Mburu *et al.*; 2018).

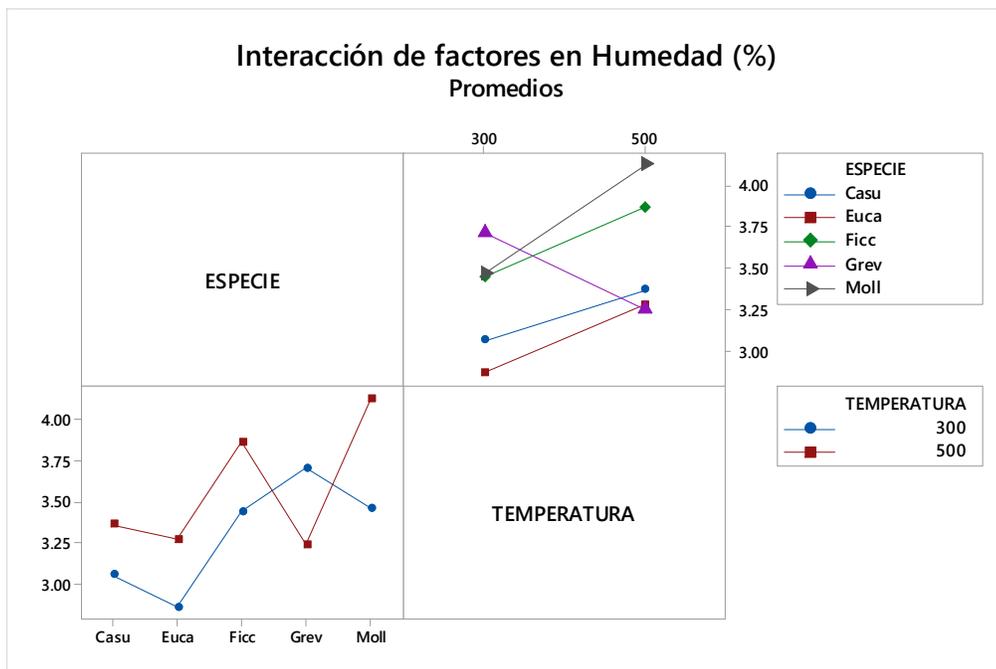


Figura 27: Interacción de factores de pirólisis en la determinación de Humedad de *Biochar*

4.2.2. Carbono orgánico (C_{org})

De acuerdo al contenido porcentual de carbono orgánico (C_{org}) según los lineamientos del IBI, los *biochar* producido son calificados como *biochar* de primera clase puesto que presentan contenido de C_{org} mayor a 60 por ciento; exceptuando el Eucalipto 300°C, dado que presenta un 59.42 por ciento, lo cual lo calificará como *Biochar* de segunda clase. (Véase anexo 3, inciso “b”)

Por otro lado, en la Figura 28 se presenta la variación por los factores de “Especie” y “Temperatura”. Estadísticamente, se comprueba que la Temperatura es un factor predominante sobre la Especie (ver anexo 3, inciso “b”). La variación de C_{org} en función a la temperatura se debe a que la aromaticidad de la estructura fijada en el *biochar* se da en función a los compuestos que se lleguen a volatilizar por el proceso de pirólisis (Chen *et al.*; 2016). De estos compuestos, los más sensibles se volatilizan a mayor temperatura y las más resistentes se van transformando en sustancias más aromáticas, las cuales fijan el carbono orgánico. (Lehman & Joseph 2015; Ospina-Guarín *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2013).

Analizando la variación por la materia prima, se observa que la Grevilea, tanto a 500°C como a 300°C, presenta una significativa diferencia en función a otras especies a la misma temperatura de pirólisis. Esta es la que presenta un mayor contenido de carbono orgánico,

puesto que se da una rápida modificación de su estructura, volviéndose más estable conforme a la temperatura se incrementa (Mburu *et al.*; 2018). La segunda especie es el Molle, también a ambas temperaturas, el cual presenta un alto contenido de sustancias volátiles (Machado *et al.*; 2013), por lo que genera que la aromatización del compuesto se dé más rápido (Ospina-Guarín *et al.*; 2014).

En el caso de Eucalipto, la gran variación por la temperatura se debe a su alto contenido de hemicelulosa (Rodrigues. & Rousset; 2009), la cual se continúa descomponiendo por el incremento de la temperatura. Caso contrario se observa en la Casuarina, la cual, por su bajo contenido de material volátil (Saleh & El-Lakany; 1979), se estabiliza fácilmente a baja temperatura. Según señala El-Lankany *et al.* (1990) citado por Diagne *et al.* (2013), esta es una de las especies que daría un carbón de gran calidad, por su bajo contenido de cenizas y su alto poder calorífico.

Como caso atípico se presenta el Ficus, el cual disminuye mínimamente el contenido de C_{org} conforme se incrementa la temperatura. esto se debería a que el carbono es inestable y aún se puede continuar descomponiendo (Lehman & Joseph; 2015) puesto que esta especie presenta mayor contenido de material volátil, en comparación a otras especies estudiadas por Channiwala & Parikh (2002) citado por Perez-Arevalon & Velazques Marti (2018).

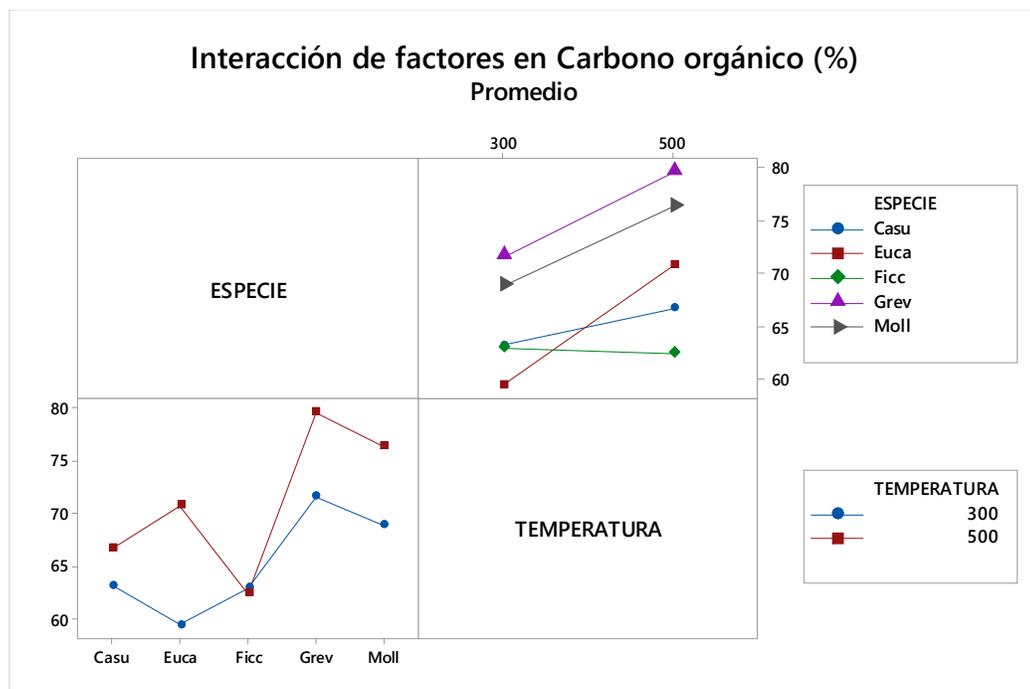


Figura 28: Interacción de los factores de Especie y Temperatura en la determinación de Carbono orgánico.

4.2.3. Relación H: C_{org}

Todos los valores de la relación H:C_{org}, de acuerdo con los lineamientos de IBI, constituyen un *biochar* apto, dado que no superan el límite de 0.7. Se observa en la Figura 29 la determinación de la “Especie” y la “Temperatura” en la Relación de H:C_{org}. Estadísticamente se demuestra que el factor que determina esta variación es la temperatura (Ver anexo 3, inciso “c”) pues a 300°C del proceso de pirólisis, el ratio molar es de 0.3025, mientras que a 500°C se incrementa a 0.6044.

A mayor temperatura se obtiene un ratio H:C_{org} menor, lo que representa el grado de aromaticidad final del producto, es decir, mientras menor sea este valor, mayor será la estructura aromática; por lo tanto, será más estable (Manyà, *et al.*; 2014), Este índice disminuye debido a que los compuestos lignocelulósicos presentes, los cuales son fácilmente pirolisados, liberan radicales -H que se desprenden en la fase gaseosa (Lehmann & Joseph; 2015); por ende, el grado de aromaticidad se puede inferir por la insaturación de los radicales -H.

Con relación a la especie, no se observa una diferencia significativa entre ellas; la mayor diferencia se observa respecto al Ficus, sin embargo, el Eucalipto, la Grevilea, el Molle y la Casuarina presentan un comportamiento similar, lo que se respalda en resultados similares como los de Saleh & El-Lakany (1979), Rodrigues & Rousset (2009), El-Lankany *et al.* (1990) citado por Diagne, N. *et al.* (2013), Mburu *et al.* (2018), Machado *et al.* (2013).

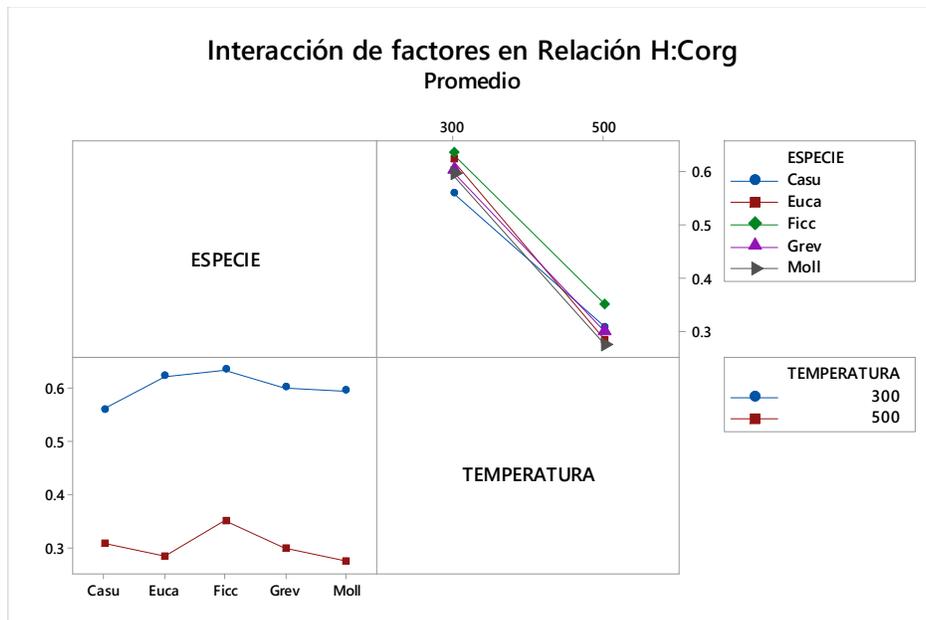


Figura 29: Interacción de factores Especie y Temperatura en la relación H:C_{org}

4.2.4. Cenizas totales

La interacción de los factores de Especie y Temperatura en cenizas del *biochar* producido, según se observa en la Figura 30, estadísticamente se comprueba que la Especie es el factor determinante para la cantidad de cenizas presentada, esto debido a que los componentes celulósicos y no celulósicos de la materia prima determinarán los compuestos que pasarán a otro estado y los componentes minerales, carbonatos y otros son los que permanecerán en la estructura del producto por su alto punto de ebullición. (Mohammad *et al.*; 2012 y Perez-Arevalo & Velazques-Martí ;2018)

Respecto a la variación de la especie, estadísticamente se presenta una diferencia significativa en cada una de estas. La especie que presenta mayor contenido de cenizas es Ficus, con un promedio de 21.690 por ciento, presenta un alto contenido de sustancias diferentes a las lignocelulósicas que permanecerán después del proceso de pirólisis. Esto es seguido de la Casuarina, con un 18.577 por ciento presenta alto contenido de cenizas debido a las micorrizas que son formadas con la especie, según Diagne *et al.* (2013), se incrementa el contenido de N, P, Ca, K y Mg.

El Eucalipto, con un 17.722 por ciento de cenizas, tiene un comportamiento similar, dado que también se adapta a ambientes salinos y fija los nutrientes similares a la Casuarina. En el caso del Molle, el cual presenta un 12.003 por ciento, según Machado *et al.* (2019), la presencia de oxalato de calcio en la especie es convertido en ácido oxálico y calcio presentándose en el *biochar*. La Grevilea, la cual presenta un 11.43 por ciento de cenizas, es la que presenta la menor proporción debido a la dureza de la especie.

De manera general, la temperatura de producción presenta una diferencia significativa, a 500°C se obtiene un 17.159 por ciento de cenizas; mientras que, a 300°C el porcentaje disminuye a 15.410 por ciento. Según Ospina-Guarín *et al.* (2014), los minerales presentes en la materia prima presentan un alto punto de ebullición por lo que su incremento porcentual en el *biochar* producido se debe a la conversión de los otros compuestos en los productos líquidos y gaseosos.

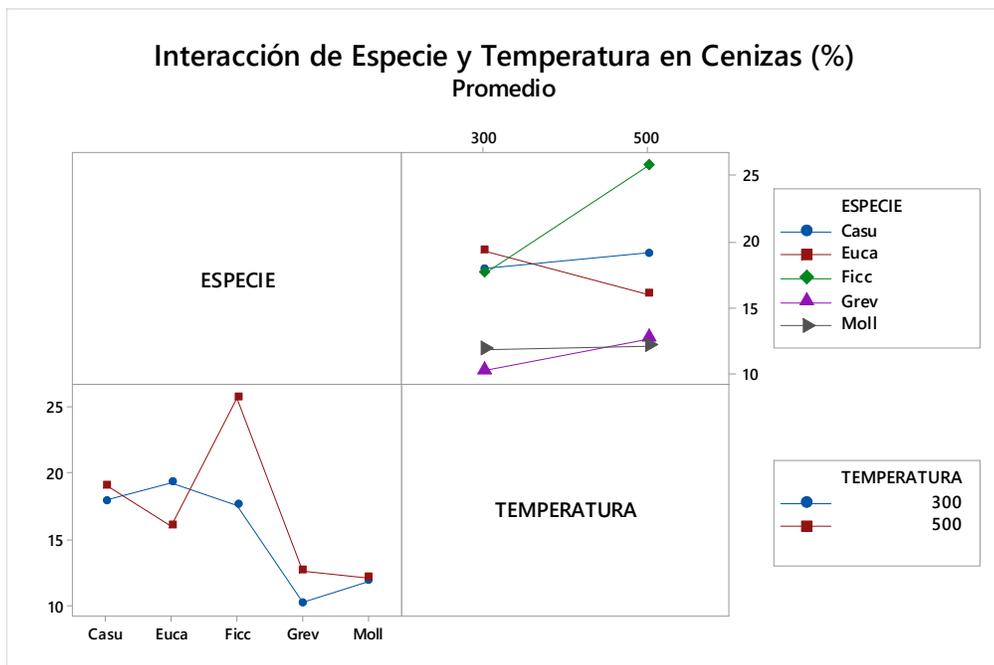


Figura 30: Interacción de Especie y Temperatura en Cenizas

4.2.3. Nitrógeno (N) %

La interacción de los factores de Temperatura y Especie en la determinación de contenido de Nitrógeno (N) del *biochar* producido, como se observa en la Figura 31, estadísticamente se puede afirmar que el factor determinante del proceso es la Especie; sin embargo, se presenta la influencia de la Temperatura como un factor importante (Ver Anexo 3, inciso “e”).

En lo que respecta a la Especie, se observa una diferencia significativa entre cada una de estas. La especie que presenta el mayor contenido de nitrógeno es Casuarina con un 1.309 por ciento, la segunda especie es Molle con 1.043 por ciento, estas seguidas de Ficus con 0.820 por ciento, Eucalipto con 0.792 por ciento y finalmente Grevilea con 0.792 por ciento. En este proceso, la materia prima determina el contenido inicial del componente y, además, la forma en la que se presentará para determinar su grado de conversión a otro estado.

La Casuarina sobresale puesto que, adicionalmente a su estructura, de acuerdo con Diagne *et al.* (2013), formaría ectomicorrizas con las que ayuda a fijar el N en el suelo y para la misma especie en similar magnitud que las leguminosas, lo que le permitiría adaptarse a suelos pobres en N.

De manera general, lo correspondiente a la temperatura, estadísticamente se observa una diferencia significativa entre cada una de ellas, a 300°C del proceso de pirólisis, la concentración de N de *biochar* es de 1.029 por ciento; mientras que a 500°C la concentración disminuye a 0.866 por ciento. Se afirma que, a mayor temperatura, menor será el contenido de N por ciento debido a que, según lo indicado por Czernik & Bridgwater (2004) y Mohan *et al.* (2006), los compuestos enriquecidos en -N, que serían principalmente las aminas y amidas, son los que se volatilizan en el proceso de pirólisis, convirtiéndose en bio-oíl que es enriquecido en estos compuestos. En caso de que, estos compuestos permanezcan en el *biochar* producido, incrementaría la descomposición química del material, lo cual afectaría negativamente a su estabilidad.

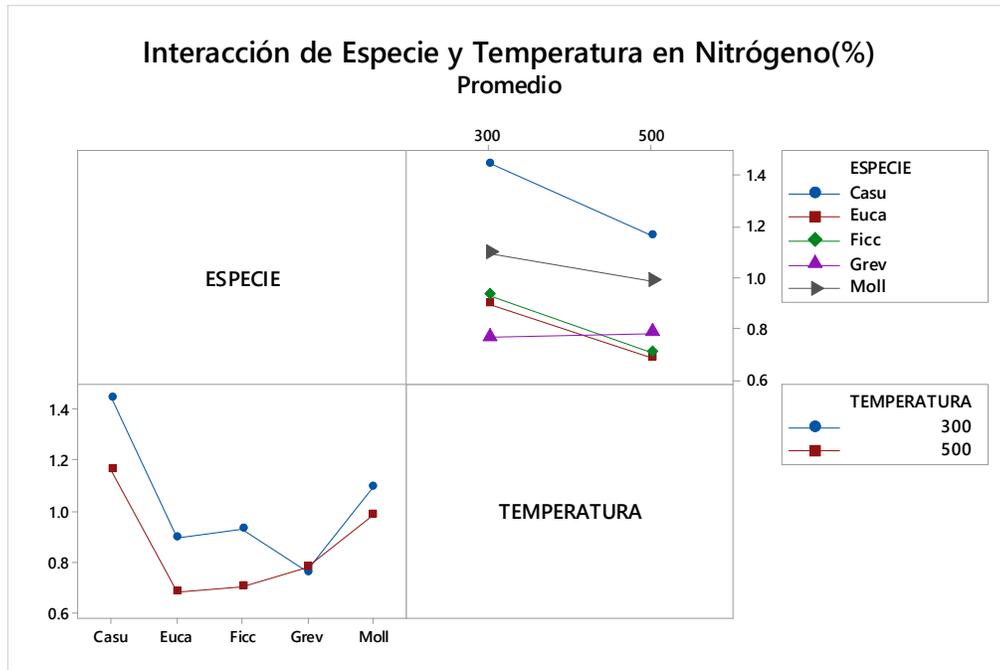


Figura 31: Interacción de factores Especie y Temperatura en la determinación de N%

4.2.4. pH

La interacción de los factores de Especie y Temperatura que determinan el pH del *biochar* producido, como se presenta en la Figura 32, estadísticamente se afirma que el factor predominante es la Temperatura. Czernik & Bridgwater (2004) y Mohan *et al.* (2006) afirman que los ácidos carboxílicos, alcoholes, fenoles, aldehídos y cetonas, aminas, amidas y otros heterociclos que le dan el carácter ácido a la materia prima, son los compuestos que se volatilizan en el proceso de pirólisis, pasando a la fase líquida o bio-oil, dejando así un *biochar* más alcalino.

El pH de todos los *biochar* producidos es mayor a 8.263, por lo que se afirma que son alcalinos. La variación de pH en función a la temperatura presenta una diferencia significativa, ya que en el proceso de pirólisis de 500°C es de 9.607 y a 300°C, 8.97; es decir, a mayor temperatura se tendrá un pH mayor.

Entre las especies, el *biochar* más alcalino es el proveniente del Ficus, debido a su alto contenido de material volátil, por lo cual su descomposición térmica deja un *biochar* más alcalino (Channiwala & Parikh; 2002 citado por Perez-Arevalo & Velazques-Marti; 2018). El segundo tratamiento es Eucalipto que presenta un comportamiento similar al Ficus, dado que contiene un alto contenido de hemicelulosa, el cual se volatiliza (Rodrigues & Rousset, 2009). La especie que continúa es Molle, la cual también presenta alto contenido de este tipo de material (Machado, C. *et al.*; 2013).

La cuarta especie, en este caso, es la Casuarina, esto se explicaría por el bajo contenido de material volátil (Saleh, N. & El-Lakany, M.; 1979); mientras que la última especie, Grevilea, se debería a la eliminación de los ácidos de la galactosa, xilosa, arabinosa y ramnosa, además del ácido uránico que presenta la hemicelulosa (Mburu *et al.*; 2008).

La variación de pH de cada una de estas especies en función a la temperatura se da por los diferentes puntos de ebullición de los compuestos a volatilizarse, como es el caso de la Grevilea que presenta ácido uránico, el cual cambia de estado a temperaturas mayores a 300°C (Mburu *et al.*; 2008).

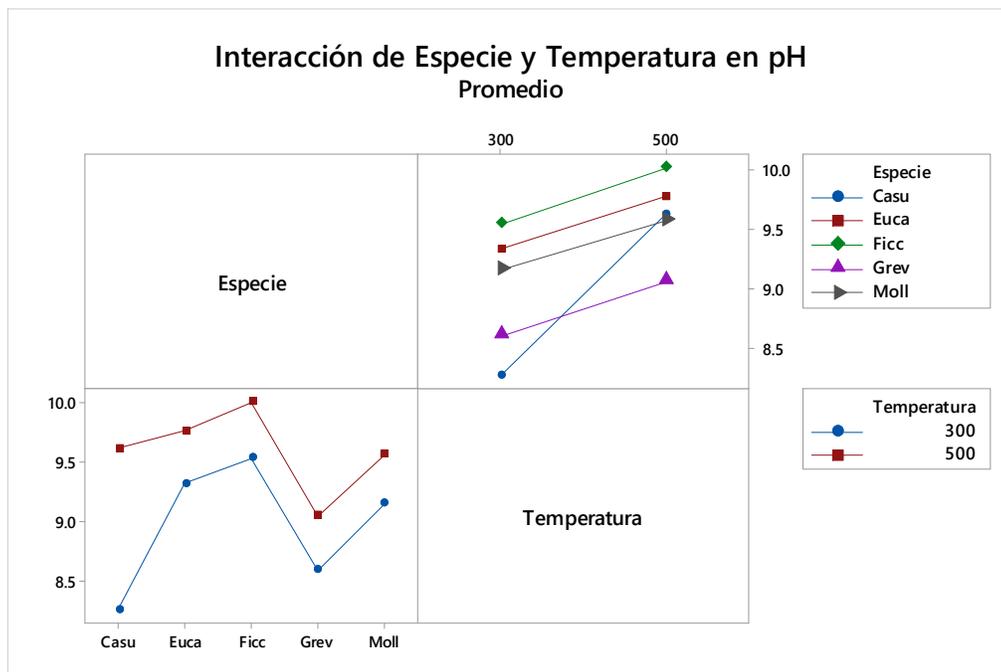


Figura 32: Interacción de factores Especie y Temperatura en pH

4.2.5. Conductividad

La interacción de Especie y Temperatura en la determinación de la conductividad, como se muestra en la Figura 33, se observa estadísticamente que la Especie es un factor que predomina sobre la Temperatura.

La especie que presenta mayor conductividad es el Ficus, el cual presenta 2.515 dS/m, la segunda especie es la Grevilea con 2.222 dS/m, seguido de Molle con 1.817dS/m y las ultimas son Eucalipto con 1.310 dS/m y Casuarina con 1.252 dS/m. Las dos últimas especies presentan un bajo contenido de sales, puesto que son especies tolerantes a estas, llegando a crecer en ambientes salinos sin incorporarla a su estructura (Sun & Dickinson; 1995).

Analizando la influencia de temperaturas, también se observa una variación significativa entre estas, pues a mayor temperatura se observa una mayor conductividad o salinidad. A 300°C del proceso de pirólisis se obtiene *biochar* con conductividad de 1.633 dS/m, mientras que, a 500°C es de 2.013 dS/m. La variación de este se debe a que las sales no cambian de estado a las temperaturas aplicadas; por lo cual permanece en el producto y aumentan porcentualmente, en función a los componentes lignocelulósicos que cambian de estado y disminuyen su concentración (Mohammad *et al.*; 2012 y Perez-Arevalo & Velazques-Marti; 2018).

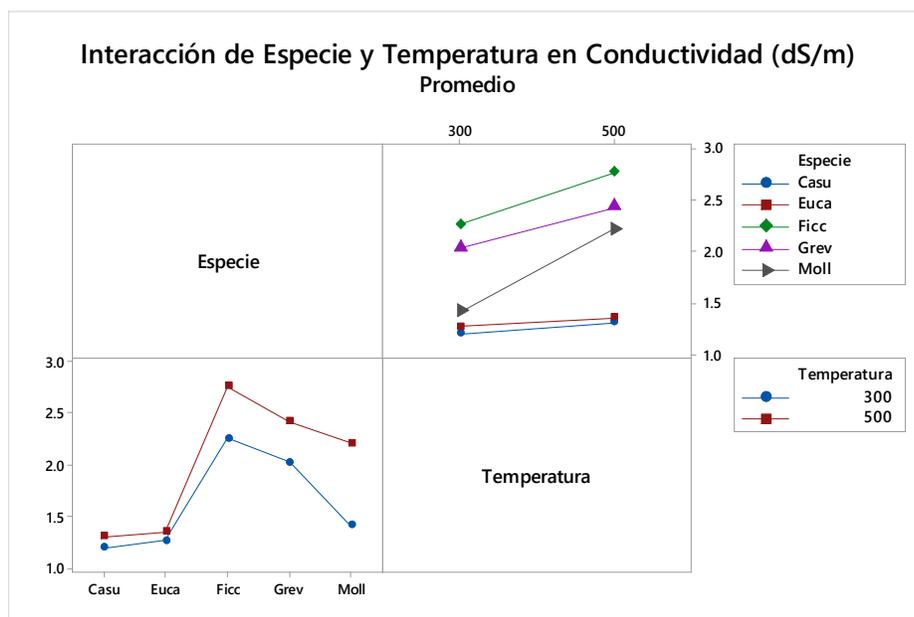


Figura 33: Interacción de Especie y Temperatura en Conductividad (dS/m)

4.2.6. Carbonatos

La interacción entre la Especie y la Temperatura en la determinación de los carbonatos, como se muestra en la Figura 34, estadísticamente se observa una predominancia de la Temperatura sobre la Especie en la determinación de la concentración del *biochar* producido. Entre la temperatura de pirólisis se observa una diferencia significativa, a una temperatura de 300°C el porcentaje de carbonatos es de 2.157 por ciento; mientras que a 500°C la concentración se incrementa a 6.814 por ciento. Esta variación se da puesto que, a bajas temperaturas los carbonatos provienen de la materia prima y los aniones inorgánicos absorbidos; mientras que a altas temperaturas se llega a precipitar los cationes inorgánicos absorbidos (Yuan *et al.*; 2011).

Entre las especies, estadísticamente existe una diferencia significativa entre cada uno de estas. Las dos primeras especies que presentan mayor presencia de carbonatos son Molle y Ficus, seguido por Casuarina, Eucalipto y Grevilea los cuales en promedio presentan 6.902 por ciento, 6.494 por ciento, 4.160 por ciento, 2.492 por ciento y 2.373 por ciento respectivamente. Cabe señalar que la materia prima influye en la presencia de alcalinidad y los minerales que los compone, los cuales también se expresan en las cenizas, en el caso de la Casuarina presenta un mayor contenido respecto al Eucalipto y Molle, el cual se debe a

que las leguminosas absorben más cationes inorgánicos durante su proceso de crecimiento (Yuan & Xu; 2012).

Ren Yong *et al.* (2019) afirma que los carbonatos tienen relación con el pH, estos aparecen por la descomposición térmica debido a que son las bases conjugadas dejados por los ácidos orgánicos solubles; en este estudio se presenta un contraste con el pH, es decir mientras este tiende a incrementarse, la presencia de carbonatos lo hace de la misma manera.

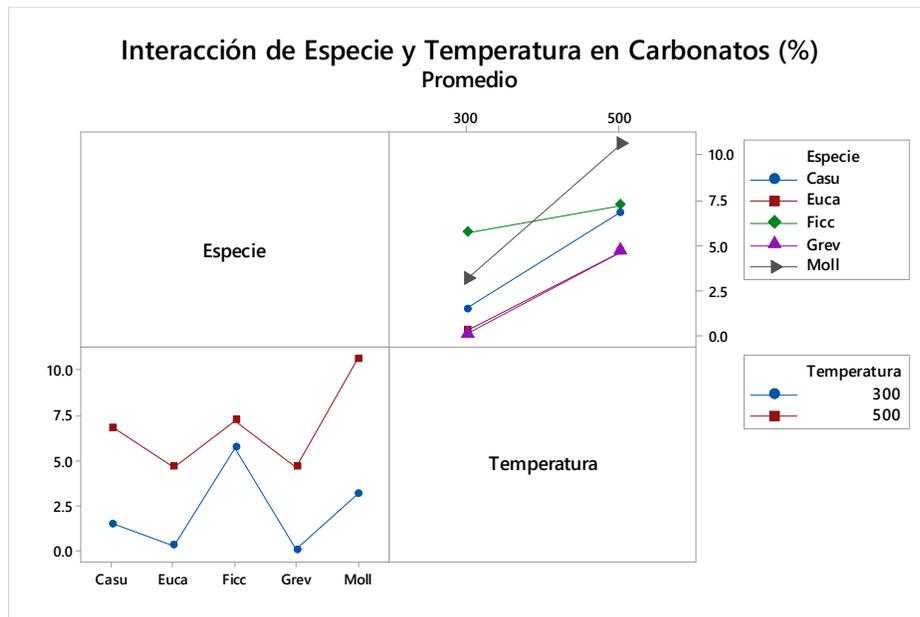


Figura 34: Interacción de factores Especie y Temperatura en la determinación de Carbonatos

4.2.7. Distribución de partículas

La distribución de partículas presentado en la Figura 35 no presenta una determinación significativa por la temperatura o la especie. Si bien se debe tener en cuenta, según otros estudios, el tamaño de la partícula producida permite afirmar que es más estable porque la presión de vapor y la parte sólida hace posible que se una segunda reacción la cual implica una repolimerización y, por ende, una mayor estabilidad del producto (Manyà *et al.*; 2014)

Esta distribución no normal se debe a que se ha considerado como muestra la poda del individuo, la cual incluye troncos lisos, uniones o ramificaciones y otros; por lo cual, la descomposición o proceso de pirólisis, si bien el proceso térmico se llevó de manera

uniforme, la variedad de la materia prima ha añadido otros factores para determinar el tamaño de partículas.

Para evitar mayor influencia en los resultados y posibles errores en las pruebas anteriormente presentadas, se procedió a homogenizar la muestra moliéndolas y tamizándolas hasta que las partículas sean menores a 0.2 mm, tamaño con el cual se lleva a cabo cada uno de los ensayos de caracterización y estabilidad.

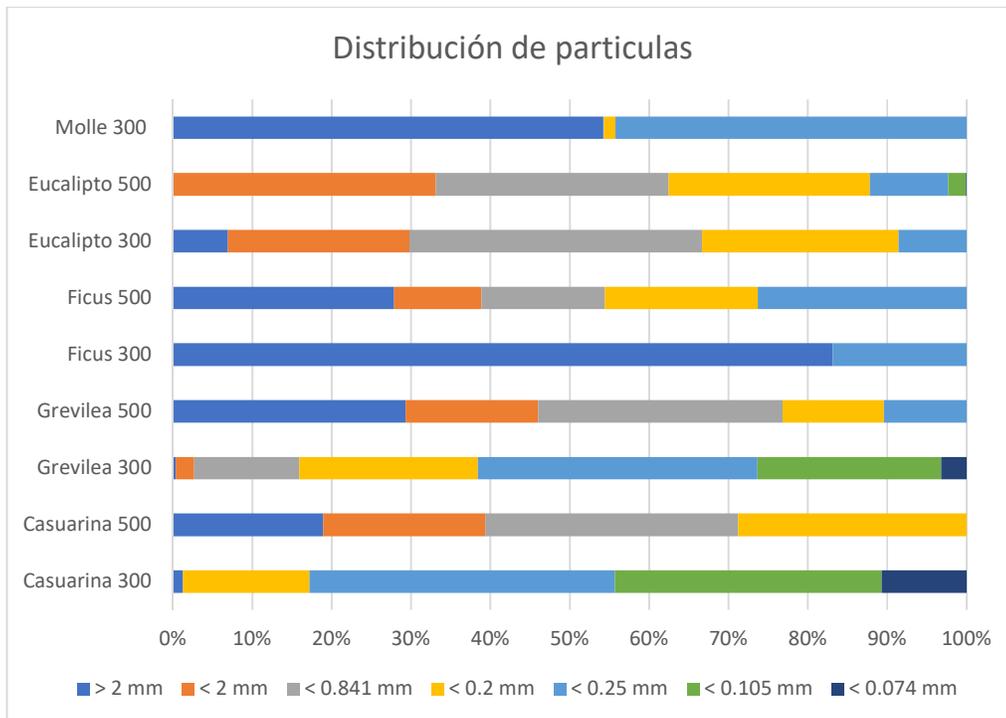


Figura 35. Distribución de partículas de *biochar* producido

4.3. Estabilidad del *biochar*

La estabilidad del *biochar* se evalúa en base a la composición de carbono lábil, oxidable o medio y recalcitrante, a partir de este se determina el grado de estabilidad. En el Cuadro 11 se muestra la variación de cada uno de los parámetros mencionados.

Cuadro 11. Descomposición del *biochar*

Especie	Parámetro				
	Carbono orgánico (%)	Carbono lábil (%)	Carbono oxidable (%)	Carbono Recalcitrante (%)	Grado de Estabilidad (%)
Euca 300	59.42 ±2.11	10.21 ±5.43	34.10 ±3.28	43.68 ±4.01	0.74 ±0.04
Ficc 300	62.92 ±5.00	21.75 ±0.62	28.49 ±1.29	50.46 ±5.46	0.80 ±0.02
Grev 300	71.61 ±5.12	18.96 ±5.20	27.18 ±0.99	58.91 ±5.21	0.82 ±0.02
Casu 300	63.24 ±3.26	10.23 ±1.08	29.95 ±1.75	49.00 ±4.78	0.77 ±0.04
Moll 300	68.90 ±1.69	13.29 ±3.42	28.34 ±5.88	56.30 ±3.55	0.82 ±0.03
Euca 500	70.80 ±4.80	6.72 ±7.34	18.15 ±1.33	62.49 ±4.74	0.88 ±0.01
Ficc 500	62.46 ±9.70	14.73 ±4.30	15.64 ±1.22	54.71 ±9.11	0.88 ±0.01
Grev 500	79.67 ±7.11	7.53 ±1.24	13.28 ±2.45	70.82 ±6.28	0.89 ±0.00
Casu 500	66.71 ±5.67	7.17 ±3.74	18.05 ±2.49	59.42 ±6.09	0.89 ±0.02
Moll 500	76.42 ±1.62	12.21 ±0.76	13.35 ±0.25	70.41 ±0.19	0.92 ±0.02

n = Número de repeticiones por ensayo

n = 3

4.3.3. Carbono lábil

La interacción de los factores de Especie y Temperatura determinan la concentración de carbono lábil, como se muestra en la Figura 36, estadísticamente se observa la predominancia del factor Temperatura sobre Especie. En el estudio realizado se observa que conforme la temperatura se incrementa, el contenido de carbono lábil disminuye, puesto que al realizar la pirólisis a 300°C se tiene un contenido de carbono lábil de 14.886 por ciento; mientras que a 500°C es de 9.675 por ciento. La variación se debe a que la materia orgánica se va volatilizando, generado el cambio de estado de hemicelulosa y celulosa (Chen *et al.*; 2015).

Se presenta una diferencia significativa entre las especies, siendo la que presenta mayor carbono lábil el Ficus con un promedio de ambas temperaturas de producción de 18.237 por ciento. Esta especie presenta gran cantidad de hemicelulosa (Perez-Arevalo, J. & Velazques Marti, B.; 2018), que se va volatizando de acuerdo con la temperatura, por lo cual experimenta una alta variación con la temperatura, es decir, al realizar el proceso de pirólisis a 300°C se obtiene 21.745 por ciento; mientras que, a 500°C disminuye a 14.730 por ciento. Las especies que siguen es la Grevilea, el Molle, la Casuarina y el Eucalipto presentan un contenido de carbono lábil en promedio de 13.246 por ciento, 12.751 por ciento, 8.704 por ciento y 8.466 por ciento respectivamente.

Eucalipto y Molle presentan una variación menor en función a la temperatura de pirólisis, la variación entre las temperaturas de producción es de 3.481 por ciento y 1.080 por ciento respectivamente, ya que serían las especies que se estabilizan a más bajas temperaturas debido a la gran cantidad de ácidos los cuales son térmicamente hidrolizables (Araujo, S. *et al.*, 2016; Rodrigues, T. & Rousset, F. ,2009).

El contenido de material volátil es un indicador de estabilidad de *biochar* (Laguarta; 2013), por lo que afirma que las especies más estables serán las que menor porcentaje presenten, lo que corresponde a Eucalipto y Molle.

Por otro lado, teniendo en cuenta que el contenido de carbono lábil de los *biochar* producidos se encuentra entre 6.22 por ciento a 21.75 por ciento; se diría que no determina o afecta el suelo con el *priming effect*, puesto que no alteraría la agregación en el suelo o la disponibilidad excesiva de carbono disponible (Jiang *et al.*; 2019).

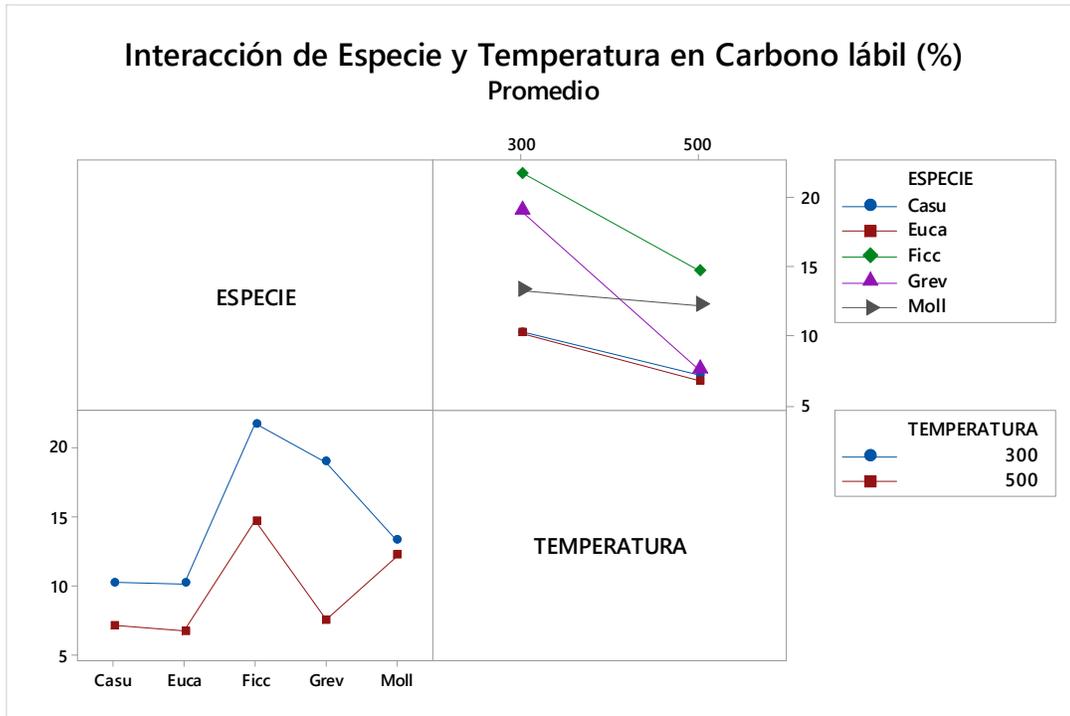


Figura 36: Interacción de Especie y Temperatura de Carbono Lábil

4.3.4. Carbono oxidable

La interacción de la Especie y la Temperatura en la determinación del carbono oxidable, como se observa en la Figura 37, estadísticamente se observa una predominancia de la Temperatura sobre la Especie. De la misma manera la variación de carbono lábil, estadísticamente se observa que el contenido carbono oxidante disminuye conforme la temperatura de pirólisis se incrementa, es decir, a 300°C del proceso de producción, se presenta un promedio de 29.611 por ciento de carbono oxidable; mientras que a 500°C se obtiene un promedio de 15.95 por ciento, cabe destacar que el promedio de la variación en función de la temperatura en cada una de las especies es similar.

Además, el promedio de los *biochar* producido se encuentra entre 13.283 por ciento y 34.097 por ciento, por lo que al ser un promedio mayor al observado en el carbono lábil se evidencia la modificación térmica de la estructura de la materia prima, es decir, la estructura se polimeriza formando una estructura más estable como es el carbono orgánico, el cual es la segunda parte más resistente del carbono (Ospina-Guarín *et al.*; 2014).

En lo que respecta al *biochar*, se contrasta con lo presentado en el carbono lábil, es decir, las especies que presentan menor carbono lábil, como Eucalipto y Casuarina, son las que presentan mayor porcentaje de carbono oxidable, en promedio presentan 26.125 por ciento y 24.000 por ciento respectivamente, lo que corresponde con los resultados obtenidos con Chen *et al.* (2017).

En lo que respecta al *biochar* de Ficus, su alto contenido de carbono oxidable se debería al alto contenido de hemicelulosa y celulosa, las cuales por tener una estructura propensa a la descomposición térmica y baja aromatización, su mayor composición se concentra en el carbono oxidable (Rodrigues & Rousset; 2009).

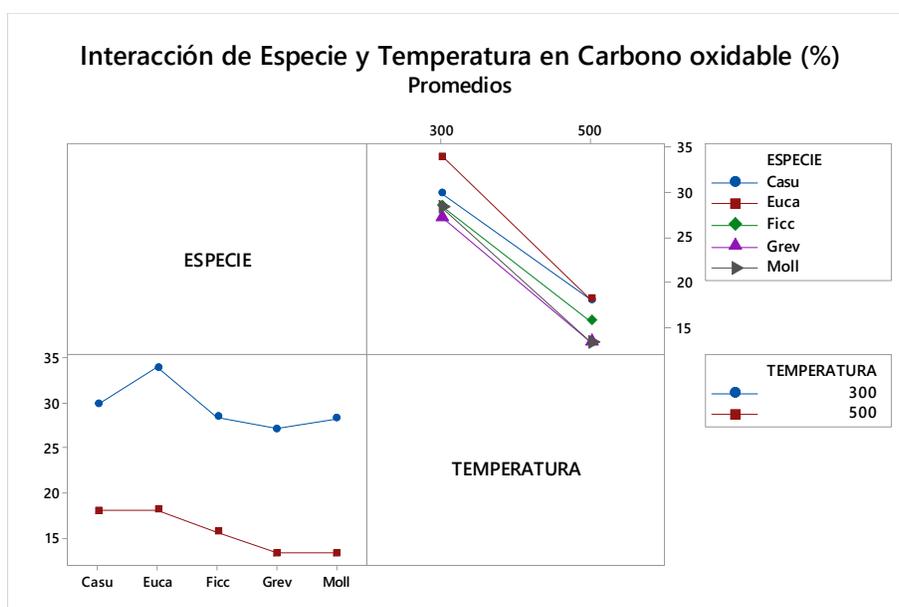


Figura 37. Interacción de Especie y Temperatura en Carbono Oxidable (%)

4.3.5. Carbono recalcitrante

La interacción de Temperatura y Especie en la determinación de carbono recalcitrante, como se muestra en la Figura 38, estadísticamente presenta una predominancia del factor de Temperatura sobre la Especie. La relación del carbono recalcitrante con la Temperatura es directa, dado que a mayor temperatura se observa mayor contenido de carbono recalcitrante, es decir, el *biochar* producido a 300°C presenta una concentración de 51.671 por ciento; mientras que a 500°C es de 63.571 por ciento.

El porcentaje de carbono recalcitrante, en este estudio varía entre 43.683 por ciento y 70.823 por ciento, el cual es un indicador de la formación de carbono más aromático y estable

(Keiluweit *et al.*; 2010) porque se da una mayor transformación de los compuestos de lignina, celulosa y hemicelulosa, además de los polisacáridos y proteínas (Suárez-Abelenda *et al.*; 2017).

En lo que respecta a la especie, se observa un contraste con lo descrito por el carbono lábil y oxidable, es decir, las especies como la Grevilea y Molle, presentan un alto contenido de carbono lábil en promedio de 13.246 por ciento y 12.751 por ciento respectivamente, bajo contenido de carbono oxidable, para cada uno de 20.230 por ciento y 20.8467, y alto contenido de carbono recalcitrante de 64.865 por ciento y 63.355 por ciento. En el caso de estas dos especies, experimentan una variación respecto a la temperatura, la cual en promedio es de 11.9166 por ciento y 14.11 por ciento.

Por otro lado, Ficus, el cual presenta un mayor contenido de carbono lábil de 18.237 por ciento, contenido de carbono oxidable de 22.065 por ciento y es la especie con menor contenido de carbono recalcitrante el cual es 52.587 por ciento. La variación en función a la temperatura de carbono recalcitrante es de 4.273 por ciento, la cual es la menor diferencia entre temperaturas.

Entre estas 3 primeras especies, corresponde que la descomposición térmica se da en función al material presentado, la especie con más hemicelulosa es el Ficus, por lo cual presenta mayor carbono mineralizable y su grado de recalcitrancia es menor (Rodrigues & Rousset; 2009); mientras que en especies con mayor dureza como es el caso de la Grevilea (Mburu *et al.*; 2018) o alto contenido de ácidos fácilmente degradable como el caso del Molle (Machado *et al.*; 2019), son especies que se estabilizan rápido en función a la parte degradable y tienen la estructura para ser modificados y llegar a ser más estable.

Aller (2016) sostiene que la variación se debe a la estructuración que deja la pirólisis, la primera temperatura de 300°C es caracterizada por un carbono en transición dado que es el resultado de la deshidratación de los materiales volátiles y la depolimeración de los biopolímeros, la segunda temperatura de °C, la conformaría un carbono amorfo dado que se encuentra pequeñas unidades aromáticas en diversas estructuras que está casi totalmente despolimerizada.

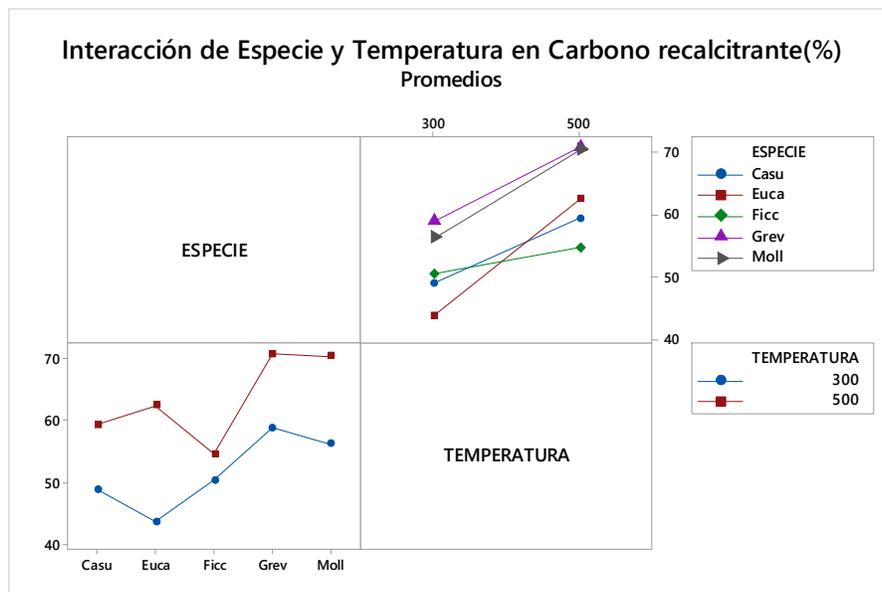


Figura 38: Interacción de Especie y Temperatura de Carbono Recalcitrante (por ciento)

4.3.6. Grado de estabilidad

La interacción de la Especie y la Temperatura en la determinación de grado de estabilidad, como se muestra en la Figura 39, presenta estadísticamente una mayor determinación por la Temperatura, siendo mínima la influencia por Especie. El grado de estabilidad se incrementa con la temperatura, dado que, en este caso y de manera general, a 300°C del proceso de pirólisis el grado de estabilidad es de 0.790 y a 500°C es de 0.892.

El grado de estabilidad de los *biochar* evaluados se encuentran entre 0.735 y 0.921, todos los cuales constituyen una enmienda estabilizada para su aplicación en el suelo, por tener un grado de estabilidad mayor a 0.500 establecido por Lopez *et al.* (2010).

El grado de estabilidad guarda correlación con el bajo contenido de nitrógeno presentado, la baja concentración de humedad, la presencia de carbonatos y el elevado pH (Lopez *et al.*; 2010). En este estudio, el *biochar* producido con mayor grado de estabilidad es Molle 500, el cual presenta un contenido de N de 0.989 por ciento, humedad 4.1233, carbonatos en 10.630 por ciento y un pH de 9.570. El mismo comportamiento se presentan en los otros *biochar* producidos, el cual varía en función a la temperatura.

Por otra parte, en función a la Figura 39, se elaboró un análisis de regresión múltiple con los otros componentes, es decir, carbono orgánico, carbono lábil, carbono oxidable o medio y carbono recalcitrante. La ecuación resultante se presenta de la siguiente manera:

$$GE = 0.907 - 0.000052T^{\circ} - 0.013966C_{org} + 0.00082C_{lab} - 0.000479C_{oxd} + 0.15923 C_{rec}$$

En esta ecuación se demuestra que el grado de estabilidad tiene una relación inversa con el contenido de carbono lábil (C_{lab}) y carbono oxidable (C_{oxd}) puesto que esta sería la materia más propensa a ser mineralizada por la biota del suelo. Por otro lado, el grado de estabilidad tiene relación directa con el carbono recalcitrante (C_{rec}) puesto que ambos indicarían el grado de aromatización del *biochar*.

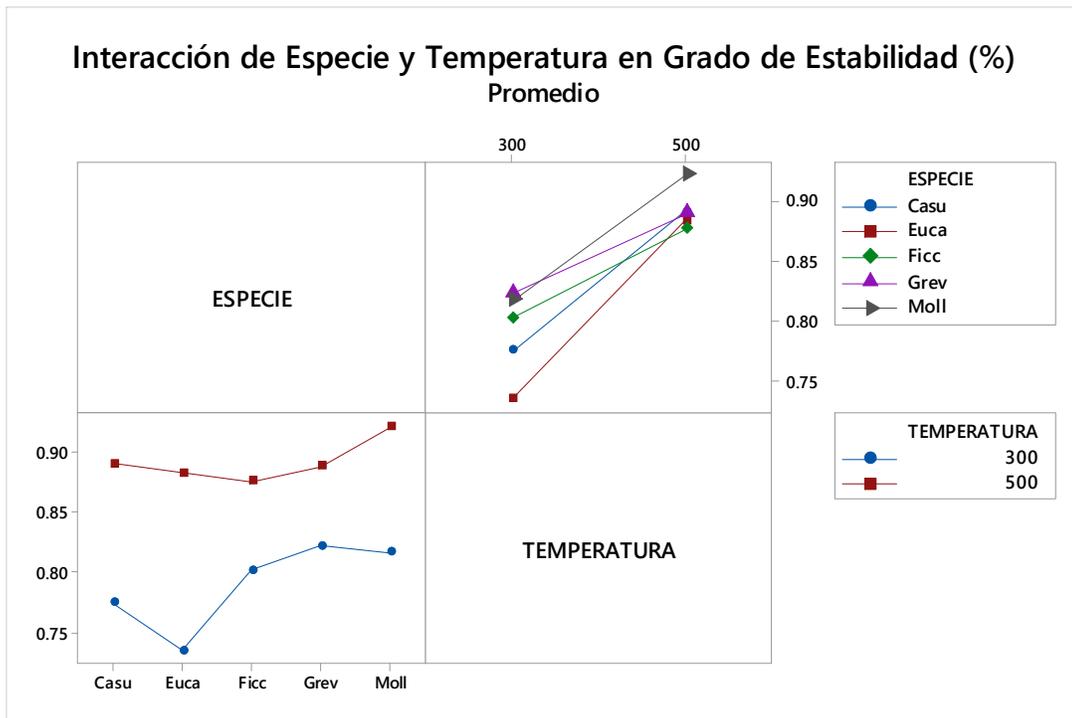


Figura 39. Interacción de Especie y Temperatura en Grado de Estabilidad

4.4. Respirométrica

La evaluación respirométrica del *biochar* producido presenta un aporte de materia orgánica significativo con relación al suelo sin esta, el blanco se puede observar en la Figura 40; mientras que en las Figuras 41, 43, 45, 47, 49 se observa el nivel de descomposición del *biochar* producido a 300°C y las Figuras 42, 44, 46, 48 y 50 se observa la descomposición del *biochar* a 500°C. Entre los dos grupos de gráficos se observa una variación significativa, en el que, al igual que el grado de estabilidad, se diría que se presenta una menor descomposición en el suelo a mayor temperatura de pirólisis, porque el *biochar* es más aromático y estable. Keiluweit *et al.* (2010) y Suárez-Abelenda *et al.* (2017) señalan que, a mayor temperatura el *biochar* se vuelve más estable dado que se vuelve más aromático, es decir, existe una mayor transformación de los compuestos de lignina, celulosa y hemicelulosa, además de los polisacáridos y proteínas por lo cual su mineralización disminuye.

Además, según el índice propuesto por Binner, E. *et al.* (2012) y reconocido por la norma austriaca de residuos sólidos, en el que se establece como límite 7 mg O₂/g DM, se afirma que el *biochar* producido es estable y apto para ser un aporte de carbono al suelo, exceptuando al Eucalipto 300 y la Grevilea 300, las cuales serían las únicas especies que no se consideran estables bajo esta afirmación

Se debe de tener en cuenta que las muestras se encuentran en contraste con lo presentado por Jiang, X. *et al.* (2019) quien señala que hasta los 200 días de producido el *biochar* presenta un efecto de mayor incremento de la biota por el contenido de material lábil que presenta, el cual se entendería como mayor disponibilidad de alimento, por lo cual los microorganismos se multiplican (Conant *et al.*, 2011; Zimmermann *et al.*, 2012; Lu *et al.*, 2014; Weng *et al.*, 2015; citados por Jiang, X *et al.* (2019).

Esta diferencia, en relación con la especie y la comparación respecto al control, se observa en la Figura 50, la cual se ve una diferencia significativa de Eucalipto y Grevilea con el control (Figura 40), el cual consistió en *biochar* sin suelo. Esto se debería a su alto contenido de carbono medio en el caso del Eucalipto y un gran contenido de carbono oxidable en el caso de la Grevilea, las cuales serían las primeras en descomponerse. (Laguarta, S., 2013 y Mateo, N., 2013).

Las otras especies estadísticamente no presentan una diferencia significativa respecto a la muestra, lo que permite afirmar su mayor grado estabilidad, impidiendo que el carbono

añadido al suelo sea liberado fácilmente a la atmosfera, alcanzando los objetivos de la IBI (2015).

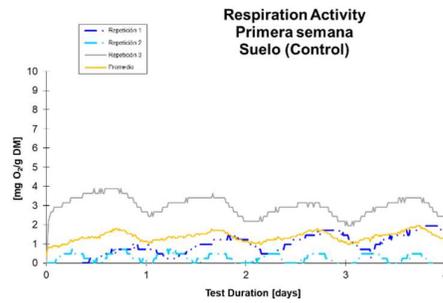


Figura 40: AT4 Suelo (Control)

AT₄ = 1.3 mg O₂/g DM

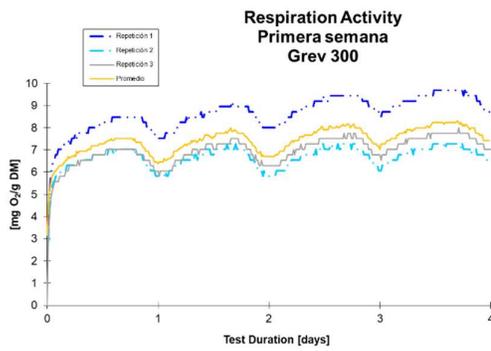


Figura 41: AT4 Grevilea 300

AT₄ = 7.6 mg O₂/g DM

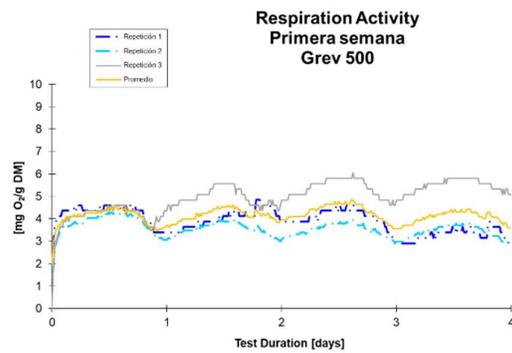


Figura 42: AT4 Grevilea 500

AT₄ = 4.4 mg O₂/g DM

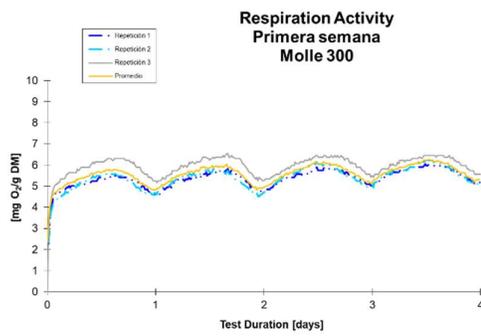


Figura 43: AT4 Molle 300

AT₄ = 5.8 mg O₂/g DM

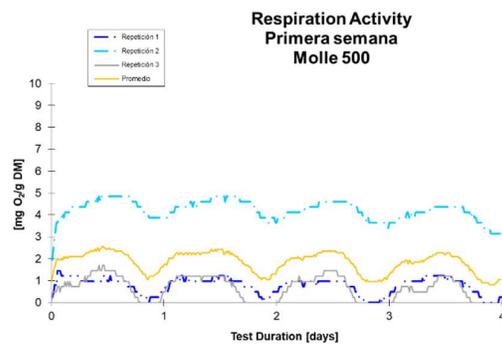


Figura 44: AT4 Molle 500

AT₄ = 2.1 mg O₂/g DM

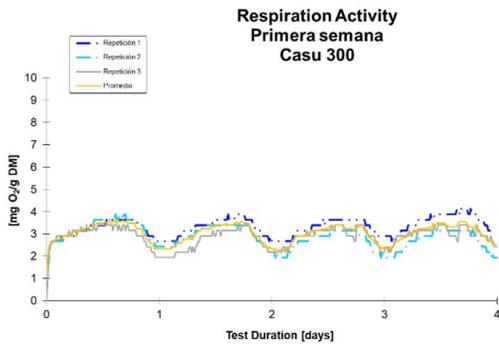


Figura 45: AT4 Casuarina 300

AT₄ = 2.9 mg O₂/g DM

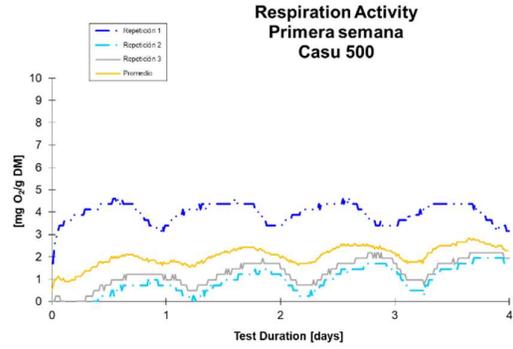


Figura 46: AT4 Casuarina 500

AT₄ = 1.8 mg O₂/g DM

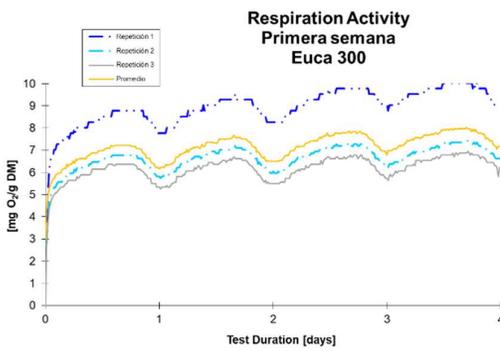


Figura 47: AT4 Eucalipto 300

AT₄ = 7.3 mg O₂/g DM

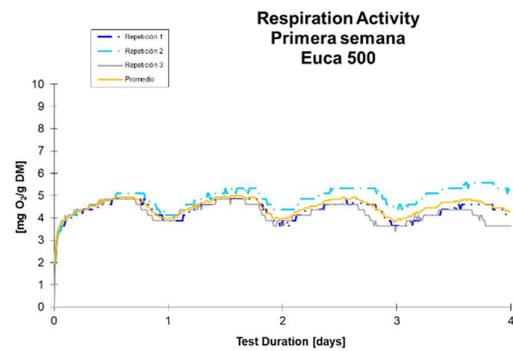


Figura 48: AT4 Eucalipto 500

AT₄ = 4.5 mg O₂/g DM

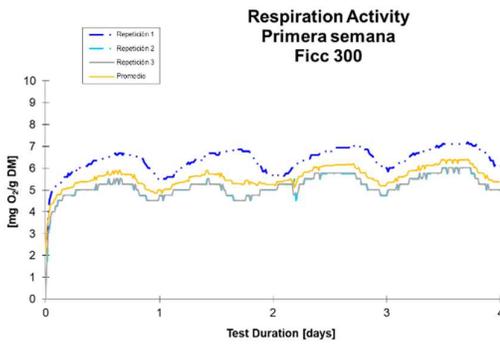


Figura 49: AT4 Ficus 300

AT₄ = 5.8 mg O₂/g DM

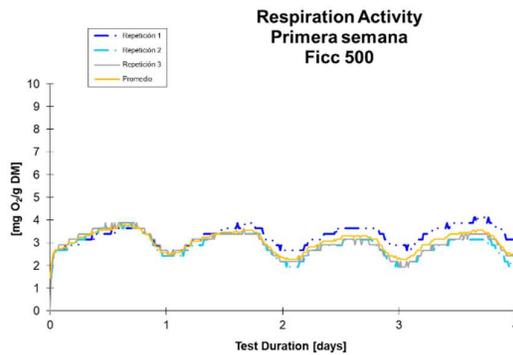


Figura 50: AT4 Ficus 500

AT₄ = 2.9 mg O₂/g DM

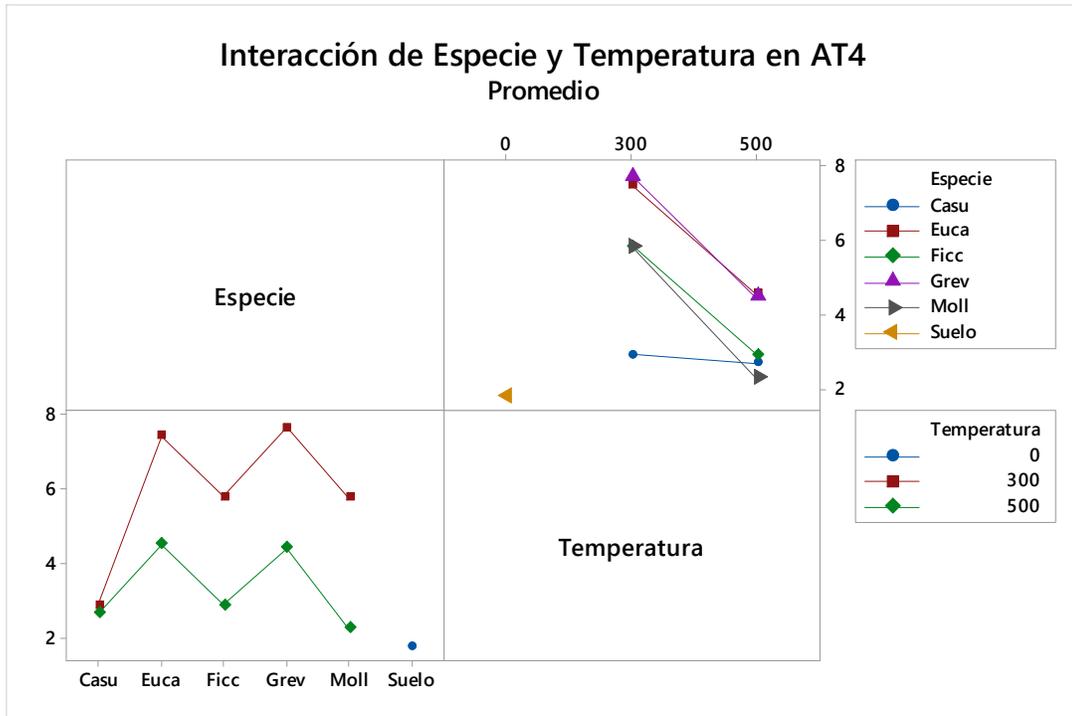


Figura 51: Interacción de especie y temperatura en AT4

4.5. Comparaciones

De acuerdo a la Figura 52, estadísticamente se observa que existe una correlación fuerte entre el grado de estabilidad (GE) y la relación $H:C_{org}$ la cual se puede contrastar en el Cuadro 12 puesto que, al presentar un P valor menor a 0.05, se afirma la correlación existente. Esta relación es inversa, por lo que se afirma que a mayor GE menor será la relación $H:C_{org}$, así como lo afirma Lopez, M *et al.* (2010); Manyà, J. *et al.* (2014) y Lehmann, J. & Joseph, S. (2015), quienes señalan que el GE tiene relación con la aromaticidad del material, pues este sería el carbono recalcitrante, es decir, es más estable y, por ende, permanecería por mayor tiempo.

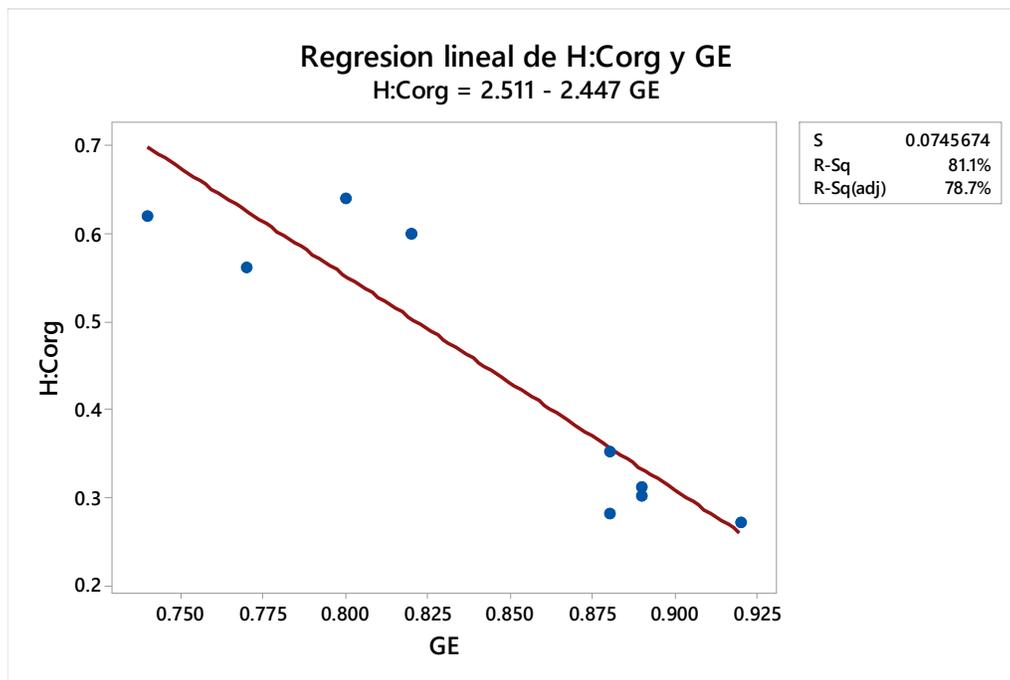


Figura 52: Regresión lineal de H: C_{org} y GE

Cuadro 12: Análisis de varianza, regresión lineal de H: C_{org} y GE

Fuente	GL	SC	CM	F valor	P valor
Regresión	1	0.190928	0.190928	34.34	0.000
Error	8	0.044482	0.005560		
Total	9	0.235410			

En la Figura 53, se observa una regresión lineal moderada entre el indicador H:C_{org} y el AT4; sin embargo, el coeficiente de determinación sería 0.51, inferior al presentado en la correlación de H:C_{org} y GE. Estadísticamente, se prueba que existe una correlación por presentar un P valor inferior a 0.05, pero se vería afectada por los factores edafoclimáticos del suelo. Así como afirman Wang *et al.* (2015), la importancia del suelo y del medio ambiente es un factor predominante en la degradación del *biochar*.

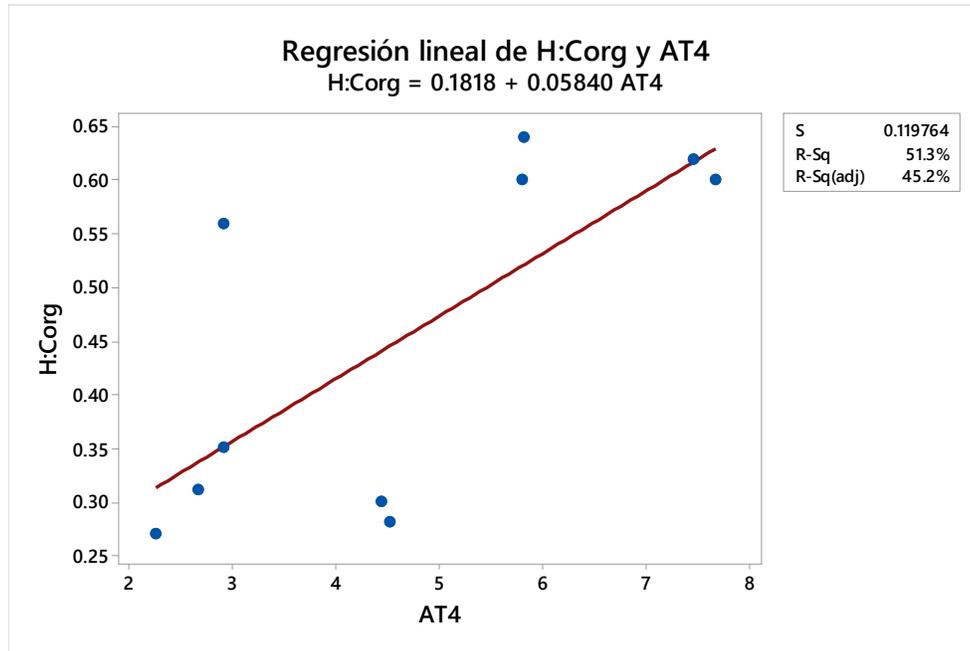


Figura 53: Regresión lineal de H: Corg y AT4

Cuadro 13: Análisis de varianza, regresión lineal de H: Corg y AT4.

Fuente	GL	SC	CM	F valor	P valor
Regression	1	0.120662	0.120662	8.41	0.020
Error	8	0.114748	0.014344		
Total	9	0.235410			

Según el Cuadro 14, estadísticamente se prueba que no existe correlación entre el GE y el índice AT4, dado que el P-valor es mayor a 0.05, lo que se refleja en el coeficiente de determinación de la Figura 54, que también es inferior a 0.5. Esto se sostiene en que, si bien existe una relación entre la composición del tipo de carbono (Klasson, K., 2017), no son tan significativos como los factores del suelo y su medio (Wang, J. *et al.*, 2015).

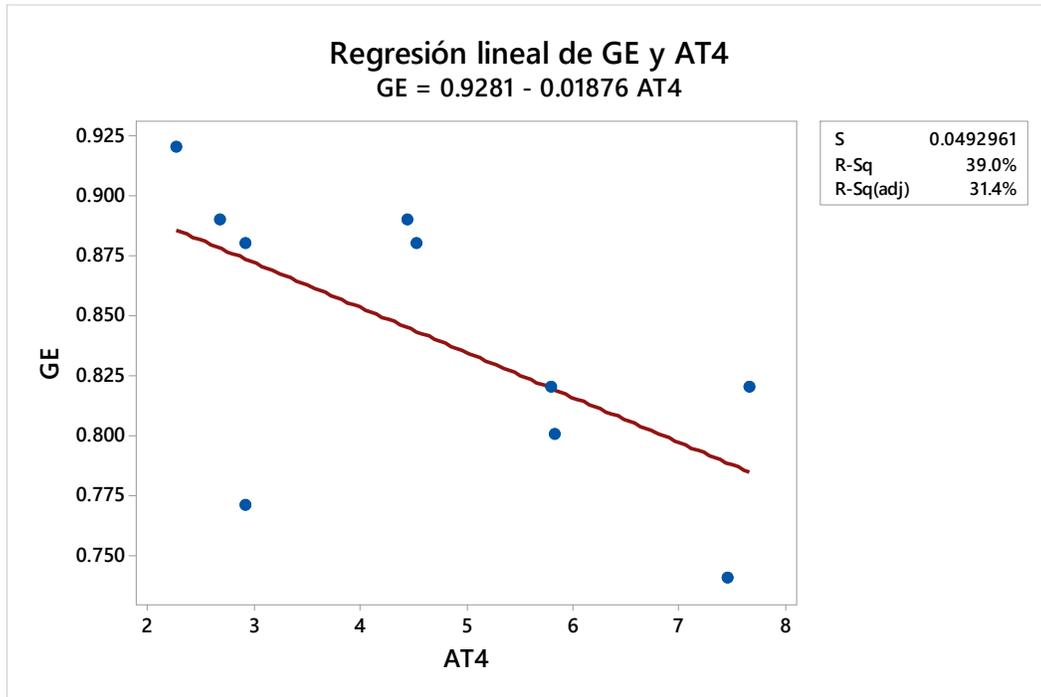


Figura 54: Regresión lineal de GE y AT4

Cuadro 14: Análisis de varianza, regresión lineal de GE y AT4.

Fuente	GL	SC	CM	F valor	P valor
Regresión	1	0.0124492	0.0124492	5.12	0.053
Error	8	0.0194408	0.0024301		
Total	9	0.0318900			

V. CONCLUSIONES

- Los *biochar* producidos son de primera calidad por el alto contenido de C_{org} y, puesto que la relación $H:C_{org}$ es menor a 0.7, se puede afirmar que constituyen un carbono estable.
- Los *biochar* obtenidos son considerados enmiendas alcalinas (pH mayor a 8), altamente poroso que aportan al contenido de carbono del suelo sin afectar otros macronutrientes del suelo.
- Los residuos de podas de la UNALM presentan un rendimiento porcentual mayor a menor temperatura (300°C) existiendo una diferencia porcentual de 6.5 por ciento respecto a la pirólisis a 500°C.
- De los datos obtenidos, la temperatura es un factor determinante en el proceso de pirólisis; sin embargo, la especie también es determinante para las características nitrógeno, humedad y cenizas que se tendrá en el *biochar* producido.
- La mayor estabilidad se presenta a un proceso de pirólisis de más alta temperatura (500°C), puesto que el índice de GE presenta una diferencia de 10 por ciento respecto a la producida a 300°C y el índice $H:C_{org}$ presenta una diferencia de 0.3.
- Existe una correlación estadísticamente significativa entre el indicador $H:C_{org}$ y el análisis respirométrico (AT4), de las muestras obtenidas.
- Teniendo en cuenta el índice de AT4, la relación $H:C_{org}$, el GE y las relaciones existentes en función a su composición, el *biochar* obtenido de Molle a 500°C de pirólisis es el más estable del estudio,

VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda, trabajar en la captación de los gases condensables y no condensables para la producción de bio-oil y Syngas, pues el alto contenido de material volátil permitiría un alto contenido energético.
- En caso se vuelva a replicar la investigación, se debe mejorar el diseño de la cámara pirolítica con una verificación previa del equipo con cálculos de transferencia de calor y la adición un mayor número de sensores de temperatura para asegurar un proceso homogéneo de pirólisis y que su vez el diseño permita asegurar una atmosfera rica en nitrógeno para evitar la combustión de la biomasa.
- En el caso del Molle, se recomienda realizar evaluaciones ecotoxicológicas del *biochar* producido a 300°C por ser considerado tener una acción antibacterial, ya que afectaría en su interacción microbiológicas del suelo.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Ameloot, N., Graber, E.R., Verheijen, F.G.A., De Neve, S., (2013). Interactions between biochar stability and soil organisms: Review and research needs. *Eur. J. Soil Sci.* 64, 379–390.
2. Aller, D., Bakshi, S., Laird, D. (2017) Modified method for proximate analysis of biochars, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2017.01.012>
3. Araujo, S., Vilas, M., Miranda, D., de Cassia, A, Vital, B., Breguez, M, Pereira, H. (2016) *Biomass and Bioenergy.* 90. 181 – 186.
4. Binner, E., Böhm, K., Lechner, P. (2012) Large scale study on measurement of respiration activity (AT4) by Sapromat and OxiTop, *Waste Management* 32. 1752–1759.
5. Brick, S; Wisconsin, M. (2010). Biochar: Assessing the promise and risks to guide U.S. policy. NRDC Issue Paper nov. 2010. Natural Resources Defense Council. USA. Consulta: 20 de dic. 2016. Disponible en internet: http://www.nrdc.org/energy/files/biochar_paper.pdf
6. Brito, J., Barrichelo, L. (1978) Características do Eucalipto como cobustível: Análise química imediata da Madeira e da casca. *IPEF.* 16. 63 – 70.
7. Balester, E (2012) El proceso de carbonización hidrotermal aplicado a la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos; Valencia, España. Disponible en, <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/30137/Tesina%20Estefania%20Ponce.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, revisado el 15 de oct. 2017.
8. Balboa, M. (2005), Biomassa arborea y estabilidad nutricional de los sistemas forestales de *Pinus pinaster* Ait, *Eucalitus globulus* Lanil. Y *quercus robur* L. en Galicia. Tesis Doctoral, Universidad de Santiago de Compostela, 256p.

9. Chen, D. *et al.* (2016) Effect of biochar temperature on chemical oxidation stability of bamboo biochar, *Bio resource Technology*. Vol. 218, pp. 1303 – 1306.
10. Crombie, K., Masek, O., Sohi, S., Brownsort, P., Cros, A. (2013) The effect of pyrolysis conditions on biochar stability as determined by three methods, *GCB Bioenergy*. 5, 122–131.
11. Czajczynska, D. *et al.* (2017) Potential pyrolysis processes in the waste management sector, *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 3, pp. 191 – 197.
12. Czernik, S., Bridgwater, A. V. (2004) Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil. *Energy & Fuels* 18, 590–598 Decreto legislativo 1278, Ley de Gestión Integral de Residuos sólidos, Diario Oficial el peruano, Lima, Perú, 23 de diciembre del 2016.
13. Delgado, L (2015) Fertilización con zinc en dos variedades de papa (*Solanum tuberosum*) en suelos de costa y sierra, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú
14. Dhyani, V., Bhaskar, T. (2019) Pyrolysis of Biomass, 217 *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous biofuels*, Cap 9: Pyrolysis of Biomass, Elsevier, 227- 244.
15. Diagne, N., Diouf, D., Svistoonoff, S., Kane, A., Noba, K., Franche, C., Bogusz, D., Buponnois, R. (2013) Casuarina in Africa: Distribution, role and importance of arbuscular mycorrhizal, ectomycorrhizal fungi and Frankia on plant development. *Journal of Environmental Management*. 128. 204 – 209.
16. FLORALIES (Association peruana de club de jardines) (2010) Paisajes verdes con poco de agua, Lima, Perú. 160 pp.
17. Gurwick, N., Moore, L., Kelly C., Elias P. (2013) A Systematic Review of Biochar Research, with a Focus on Its Stability in situ and Its Promise as a Climate Mitigation Strategy. *Plos one*, vol. 8 n°9, pp. 1-9.
18. International Biochar Initiative (2017), Climate change and biochar; disponible en <http://www.biochar-international.org/biochar/carbon>, revisado el 3 de nov. 2017.
19. International Biochar Initiative (2015), Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil, disponible en <http://www.biochar->

- international.org/sites/default/files/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final.pdf, revisado el 3 de nov. 2017.
20. Jackson, M. L. (1984) Análisis químico de suelos, Cap Determinación de materia orgánica en suelos pp 282-310 Ediciones Omega, Barcelona, España.
 21. Jiang, X.; Tan, X.; Cheng, J.; Haddix, M.; Cotrufo, M. (2019) Interactions between aged biochar, fresh low molecular weight carbon and soil organic carbon after 3.5 years soil-biochar incubations,
 22. Keiluweit, M., Nico, P.S., Johnson, M.G., Kleber, M. (2010) Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). *Environ. Sci. Technol.* 44, 1247–1253
 23. Klasson, K. T. (2017), Biochar characterization and a method for estimating biochar quality from proximate analysis results, *Biomass and Bioenergy*. 96. 50-58.
 24. La República (2017) Multan a universidad Agraria con S/2.4 millones por incendio que duró 6 horas. <http://larepublica.pe/sociedad/860370-multan-universidad-agraria-con-s24-millones-por-incendio-que-duro-6-horas> (29 de marzo del 2017), revisado el 8 de nov. de 17.
 25. Laguarda, S. (2013). Estudio de la influencia de la temperatura final y de la presión durante la pirólisis lenta de alperujo para la obtención del biochar. Universidad de Zaragoza., Huesca, España.
 26. Leavitt, S. W., Follett, R. F., & Paul, E. A. (2006) Estimation of slow- and fast cycling soil organic carbon pools from 6N HCl hydrolysis. *Radiocarbon*. 38. 2. 231 – 239.
 27. LECO Corporation (2013) Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Coal, Instrument: CHN628, Form 203-821-403.
 28. LECO Corporation (2014) TGA701 Thermogravimetric Analyzer, Specification Sheet, Form 209-149-00.
 29. Lehmann, J & Joseph, S (2009) Biochar for environmental management, Science and technology, editorial Earthscan, Londres, Reino Unido.

30. Lehmann, J., Joseph, S. (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*, 2nd ed. Routledge, London and New York.
31. Leng, L., Huang, H., (2018) An overview of the effect of pyrolysis process parameters on biochar stability, *Bioresource Technology*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.030>
32. López, M., Huerta-Pujol, O., Martínez-Farré, F. X., & Soliva, M. (2010). Approaching compost stability from Klason lignin modified method: Chemical stability degree for OM and N quality assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(2), 171–181.
33. Lutzow, M. *et al.* (2006) Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and the irrelevance under different soil conditions^ a review. *European Journal of soil Science*, Vol. 57, pp. 426 – 445.
34. Machado C., Raman, V; Tehman, J.; Maia, B.; Meneghetti, E.; Almeida, V.; Farago, P.; Khan, I.; Budel, J. (2018) *Schinus Molle*: anatomy of leaves and stems, chemical composition and insecticidal activities of volatile oil against bed bug (*Cimex lectularius*). *Rev. Brasileira de Farmacognosia*. 29, 1-10.
35. Malca-Garcia, G.; Henning, L.; Ganoza-Yupanqui, M.; Piña-Iturbe, A.; Bussmann (2017) Constituents from the bark resin of *Schinus Molle*. *Rev. Brasileira de Farmacognosia*. 27, 67-69.
36. Malińska, K (2016) Application of a modified OxiTop® respirometer for laboratory composting studies; *Archives of Environmental Protection*. 42, 56-62.
37. Manyà, J.J., Laguarda, S., Ortigosa, M.A., Manso, J.A., (2014). Biochar from slow pyrolysis of two-phase olive mill waste: Effect of pressure and peak temperature on its potential stability. *Energy and Fuels* 28, 3271–3280.
38. Martinez R.; Azpiroz, H; Rodriguez, JL; Espinoza, V; Alcalá, C.; Gutierrez Espinoza, M. (2006) Importancia de las plantaciones forestales de *Eucalyptus*. *Revista Ra. Xinhaib de la Universidad Autonoma Indigena de Mexico* 2; 815 - 846.
39. Mašek, O., Buss, W., Roy-Poirier, A., Lowe, W., Peters, C., Brownsort, P., Mignard, D., Pritchard, C., Sohi, S. (2018) Consistency of biochar properties over time and

- production scales: A characterisation of standard materials, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.02.020>
40. Mateo, N (2013) Evaluación de la capacidad de secuestro de carbono en dos suelos del valle del Ebro mediante la aplicación de biochar: estabilidad de la materia orgánica. Universidad de Zaragoza, Huesca, España.
 41. Mburu, F., Dumarcay, S., Bocquet, J., Petrissans, M., Gérardin, P. (2007) Effect of chemical modifications caused by heat treatment on mechanical properties of *Grevilea robusta* Wood. *Polymer Degradation and Stability*. 93. 401 – 405.
 42. Mohammad I., Mohammad G., Ashfaq A., Nanjappa A. (2012) Biofuels Production through Biomass Pyrolysis —A Technological Review, *Energies*. 5. 4952-500.
 43. Mohan, D., Pittman, C.U., Steele, P.H., (2006) Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. *Energy & Fuels* 20, 848–889.
 44. Moreno Casco, J. Moral Herrero, R (2008) Compostaje Cap. Indicadores de estabilidad y madurez del compost. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
 45. Mostiga, M (2014) Prospección y evaluación de los insectos y ácaros perjudiciales en especies forestales del campus de la UNALM, Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, Perú.
 46. Ondřej Mašek, Wolfram Buss, Audrey Roy-Poirier, Walter Lowe, Clare Peters, Peter Brownsort, Dimitri Mignard, Colin Pritchard, Saran Sohi, (2018) Consistency of biochar properties over time and production scales: A characterisation of standard materials, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.02.020>
 47. Ospina-Guarín V., R. Buitrago-Sierra y D. P. López-López, (2014) “Preparación y caracterización de carbón activado a partir de torta de higuera”, *Tecno Lógicas*, vol. 17, no. 32, pp. 75-84,
 48. Paco, D. (2012). Evaluación de los efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta. Universidad Autónoma de Barcelona. Disponible en https://ddd.uab.cat/pub/trerepro/2012/hdl_2072_202695/PFC_DanielPacoAbenza.pdf, revisado el 15 de nov. 2017.

49. Pérez-Arévalo, J., Velázquez-Martí, B. (2018) Evaluation of pruning residues of *Ficus benjamina* as a primary biofuel material *Biomass and Bioenergy*. 108. 217–223.
50. Prober, S., Stol, J., Gupta, V., Cunningham, S. (2014) Enhancing soil biophysical condition for climate-resilient restoration in mesic woodlands; *Ecological Engineering*. 71. 246 – 255.
51. Ren-yong, S. Jiu-yu, L., Ren-kou, X. (2019) Understanding the biochar's role in ameliorating soil acidity, *Journal of Integrative Agriculture* 18(7). 1508–1517.
52. Rodrigues, T., Rousset, P. (2009) Effects of torrefaction on energy properties of *Eucalyptus grandis* Wood, *Cerne, Lavras*. 15 (4). 446 – 452.
53. Sanchez de Lorenzo, J. (2014) Ayuntamiento de Murcia – Concejalía de Medio ambiente, *Casuarina cunninghamiana* Miq.
54. Saleh, N. & El-Lakany, M. (1979) A Quantitative Variation in the Flavonoids and Phenolics of some *Casuarina* Species. *Biochemical Systematics and Ecology*. 7. 13 – 15.
55. Singh, B., Camp-Arbestain, M., Lehmann, J. (2017) Biochar: A guide to Analytical Methods, Cap. 5 Inorganic carbon, CSIRO, Australia, 51- 63.
56. Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241, 155–176.
57. Skolmen, RG; Thomas F. (1999) *Eucalyptus globulus* labil. Eucalipto goma azul. *Silvicultura forestal* 6, 2005 -189.
58. Suárez-Abelenda, M., Kaal, J., McBeath, A. V., (2017). Translating analytical pyrolysis fingerprints to Thermal Stability Indices (TSI) to improve biochar characterization by pyrolysis-GC-MS. *Biomass and Bioenergy* 98, 306–320
59. Sun, D., Dickinson, G. (1995) Salinity effects on tree growth, root distribution and transpiration of *Casuarina cunninghamiana* and *Eucalyptus camaldulensis* planted on a saline site in tropical north Australia, *Forest Ecology and Management*. 77. 127-138.

60. Wang, S., Guo, X., Wang, K., Luo, Z. (2011) Influence of the interaction of components on the pyrolysis behavior of biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 91. 183–189.
61. Wang, J., Dokohely, M. E., Xiong, Z., & Kuzyakov, Y. (2015). Contrasting effects of aged and fresh biochars on glucose-induced priming and microbial activities in paddy soil. *Journal of Soils and Sediments*, 16(1), 191–203.
62. Wang, S., Dai, G., Yang, H., Luo, Z., (2017). Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. *Prog. Energy Combust. Sci.* 62, 33–86.
63. Yuan, J., Xu, R. (2012). Effects of biochars generated from crop residues on chemical properties of acid soils from tropical and subtropical China. *Soil Research*, 50, 570–578.
64. Yuan, J. Xu, R., Zhang, H. (2011) The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures, *Bioresource Technology* 102. 3488–3497.
65. Zornoza, R., Moreno-Barriga, F., Acosta, J.A., Muñoz, M.A., Faz, A. (2016) Stability, nutrient availability and hydrophobicity of biochars derived from manure, crop residues, and municipal solid waste for their use as soil amendments. *Chemosphere* 144, 122–130
66. Zhao, L., Cao, X., Mašek, O., Zimmerman, A., (2013) Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. *J. Hazard. Mater.* 256–257, 1–9.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1. GUÍA DE RECOLECCIÓN

1. Especies:

a. Grevilea – *Grevilea robusta*



b. Molle serrano - *Schinus Molle*



c. Casuarina - *Casuarina Cunninghamiana*



d. Ficus – Ficus benjamina



e. Eucalipto – Eucalipto spp.



2. Selección de individuos:

1. Localizar el lugar de mayor abundancia de la especie dentro del campus.
2. Seleccionar tres individuos dentro del área delimitada, de manera aleatoria, tratando de cubrir toda el área a tratar y que cumpla las siguientes características:
 - a. No debe ser un individuo de borde de la parcela seleccionada.
 - b. DAP mayor a 7.5 cm.
 - c. Copa densa o frondosa.
 - d. No debe de presentar ataque de insectos, hongos u otros.
3. Llenar los datos del individuo de la especie en el cuadro de información.
4. Registrar la colección mediante fotografías del proceso.
5. Muestreo de individuo:

6. Dividir el árbol en cuatro cuadrantes de manera perpendicular al suelo. Luego dividir nuevamente, en forma paralela al suelo dividir en dos partes iguales el dosel, en caso de que la altura de la especie sea mayor al promedio, considerar una parte superior sobresaliente, como una subdivisión más (novena parte).



En caso de considerar ocho particiones, coger muestras de dos particiones opuestos; es decir elegir un cuadrante inferior y el cuadrante superior del lado contrario.

En caso de considerar nueve particiones, seguir las instrucciones anteriores y coleccionar del noveno cuadrante restante una tercera muestra.

Colectar de preferencia:

- Ramas secas, es decir, que no presenten nuevas nervaduras o amplia cantidad de hojas.
- Ramas que impidan un correcto paso de luz o aire.
- Ramas ubicadas a menor altura de 2.4m de altura.
- Ramas caídas en el suelo, que no evidencien grado de descomposición avanzado.
- No recolectar frutos
- Colectar de las particiones más frondosas o densas.

3. Tratamiento de las muestras:

Separar las hojas de las ramas; las ramas deben de ser colocadas en una bolsa ziploc; aproximadamente 1 1/2 kg o todo el volumen de la bolsa. Las cantidades de cada porción del árbol deben ser proporcionales a las que se recolectaran.

Las hojas resultantes, se coleccionarán en una bolsa adicional.

4. Fichas

CALIDAD Y ESTABILIDAD DE BIOCHAR

Fecha:

Encargado:

Nombre común:

Nombre científico:

Ubicación:

Referencias:

Temperatura:

Condiciones meteorológicas:

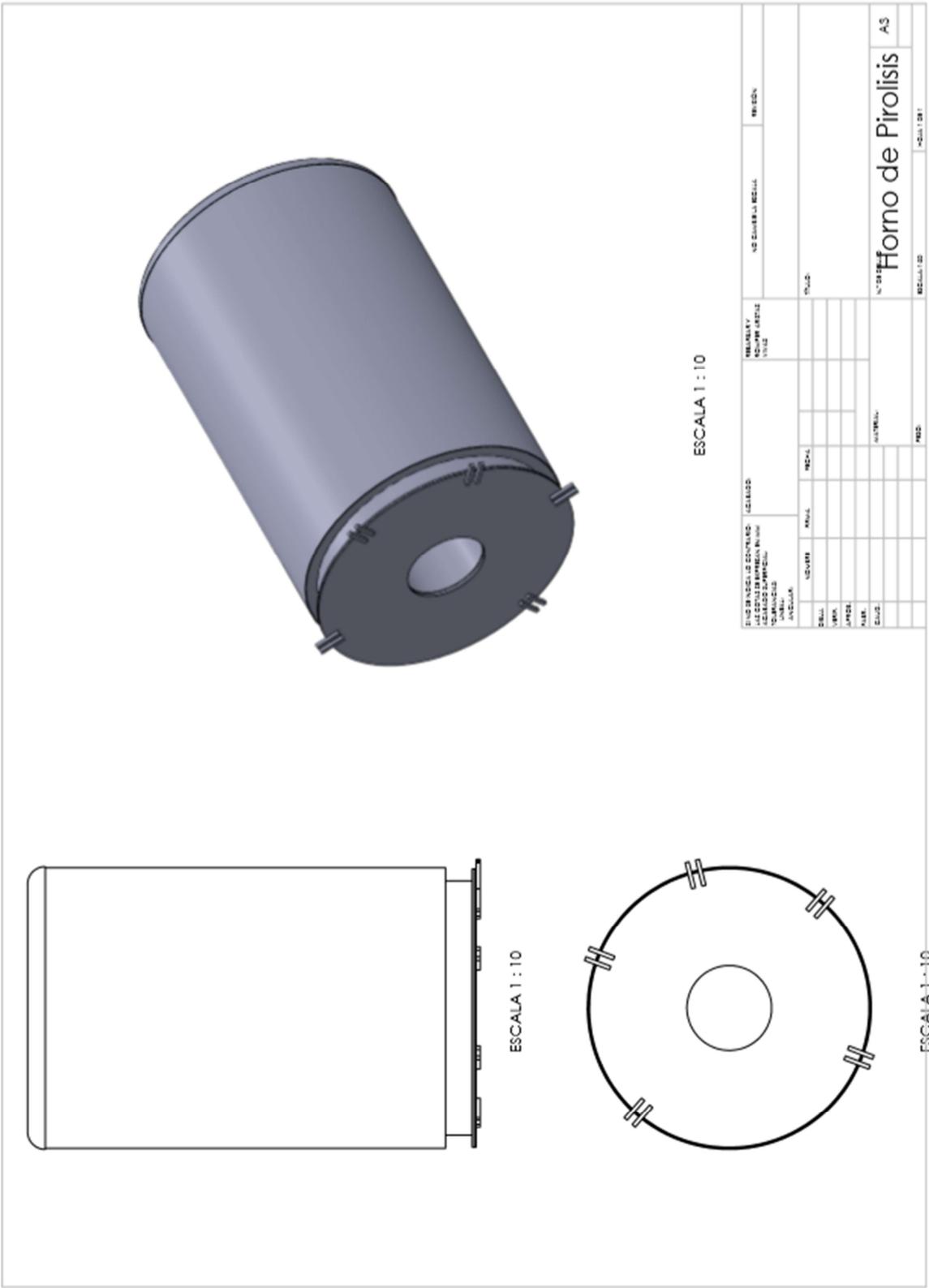
DAP:

Altura total:

Altura de dosel:

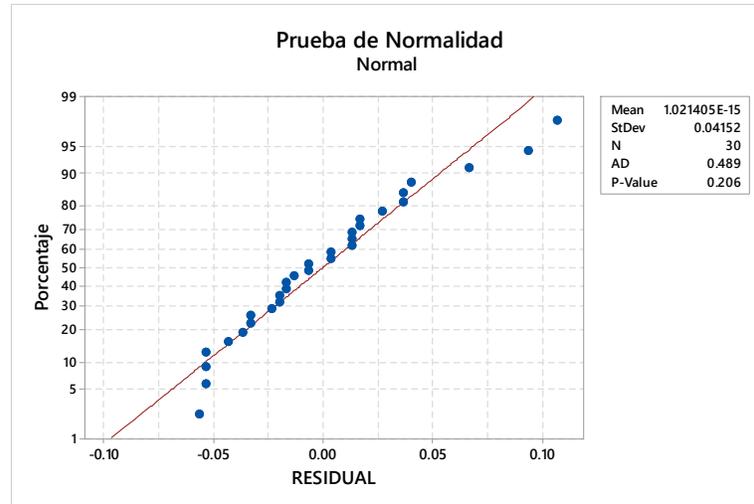
Descripción:

ANEXO 2. HORNO PIROLÍTICO



ANEXO 3. PRUEBAS ESTADÍSTICAS

a. Humedad:



- Análisis de Varianza:

Fuente	GL	Adj SC	Adj CM	F-Valor	P-Valor
ESPECIE	4	2.17788	0.544470	217.79	0.000
TEMPERATURA	1	0.53333	0.533333	213.33	0.000
ESPECIE*TEMPERATURA	4	1.09753	0.274383	109.75	0.000
Error	20	0.05000	0.002500		
Total	29	3.85875			

Comparaciones para: HUMEDAD (%)

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

ESPECIE	N	Promedio	Grupo			
Moll	6	3.79500	A			
Ficc	6	3.65500		B		
Grev	6	3.47500			C	
Casu	6	3.21333				D
Euca	6	3.06833				E

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

TEMPERATURA	N	Promedio	Grupo	
500	15	3.57467	A	
300	15	3.30800		B

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

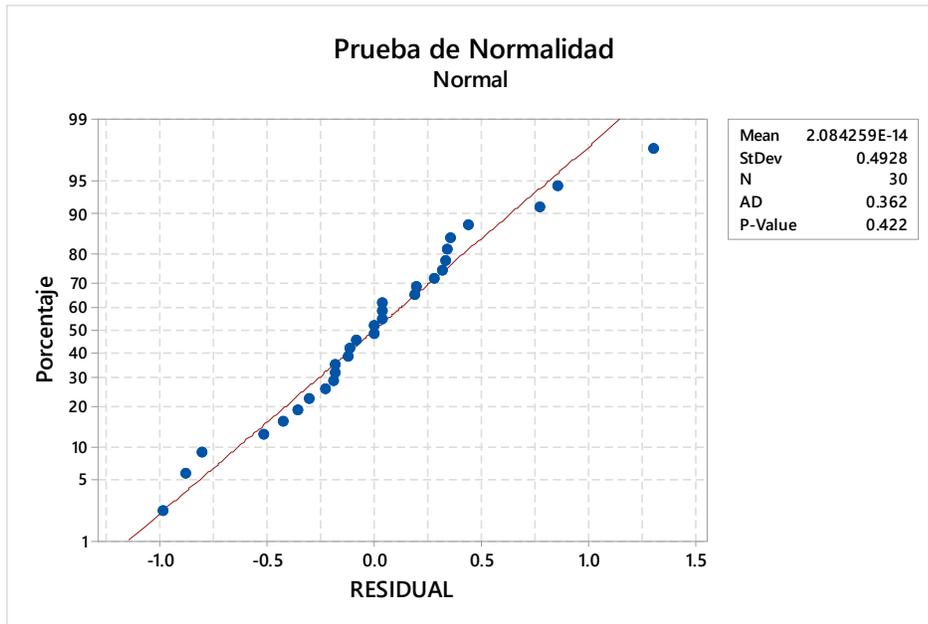
- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE*TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

ESPECIE*TEMPERATURA	N	Promedio	Grupo						
Moll 500	3	4.12333	A						
Ficc 500	3	3.86667		B					
Grev 300	3	3.70667			C				
Moll 300	3	3.46667				D			
Ficc 300	3	3.44333				D			
Casu 500	3	3.36667				D	E		
Euca 500	3	3.27333					E		
Grev 500	3	3.24333					E		
Casu 300	3	3.06000						F	
Euca 300	3	2.86333							G

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

b. Carbono orgánico (Corg)



- Análisis de Varianza

Fuente	GL	Adj SC	Adj CM	F-Valor	P-Valor
ESPECIE	4	753.57	188.393	535.05	0.000
TEMPERATURA	1	269.72	269.716	766.02	0.000
ESPECIE*TEMPERATURA	4	125.25	31.313	88.93	0.000
Error	20	7.04	0.352		
Total	29	1155.58			

Comparaciones para: C org. (%)

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

ESPECIE	N	Promedio	Grupo		
Grev	6	75.6407	A		
Moll	6	72.6642		B	
Euca	6	65.1118			C
Casu	6	64.9749			C
Ficc	6	62.6895			D

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

TEMPERATURA	N	Promedio	Grupo	
500	15	71.2147	A	
300	15	65.2178		B

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

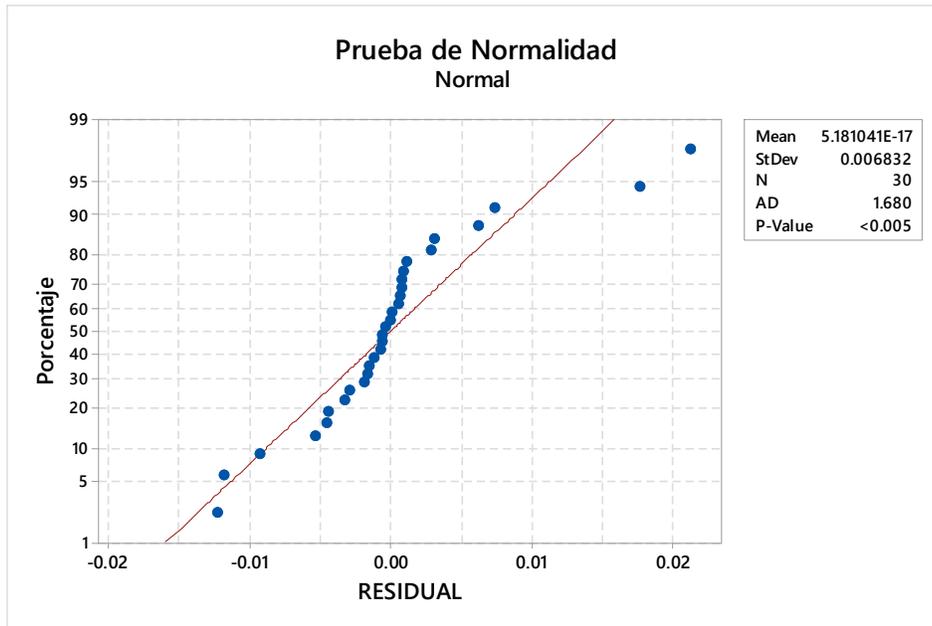
- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE*TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

ESPECIE*TEMPERATURA	N	Promedio	Grupo						
Grev 500	3	79.6743	A						
Moll 500	3	76.4242		B					
Grev 300	3	71.6071			C				
Euca 500	3	70.7992			C				
Moll 300	3	68.9042				D			
Casu 500	3	66.7133					E		
Casu 300	3	63.2366						F	
Ficc 300	3	62.9168						F	
Ficc 500	3	62.4623						F	
Euca 300	3	59.4244							G

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

c. Relación H: Corg:



- Análisis de Varianza

Fuente	GL	Adj SC	Adj CM	F-Valor	P-Valor
ESPECIE	4	0.013950	0.003488	51.53	0.000
TEMPERATURA	1	0.683540	0.683540	10099.36	0.000
ESPECIE*TEMPERATURA	4	0.006736	0.001684	24.88	0.000
Error	20	0.001354	0.000068		
Total	29	0.705580			

Comparaciones para: RELACIÓN H:Corg

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

ESPECIE	N	Promedio	Grupo
Ficc	6	0.493597	A
Euca	6	0.453587	B
Grev	6	0.450628	B
Moll	6	0.435142	C
Casu	6	0.434213	C

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

TEMPERATURA	N	Promedio	Grupo	
300	15	0.604379	A	
500	15	0.302487		B

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

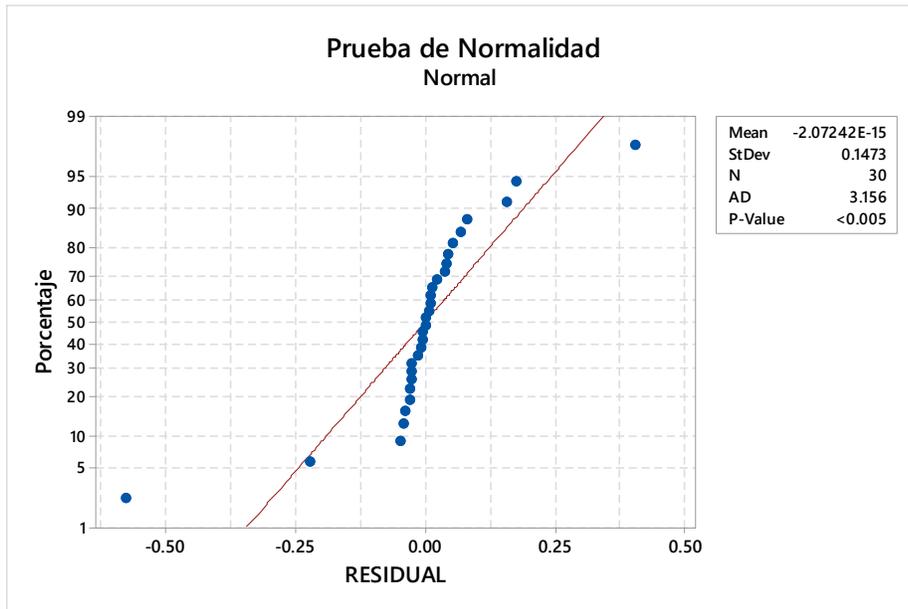
- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE*TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

ESPECIE*TEMPERATURA	N	Promedio	Grupo							
Ficc 300	3	0.636472	A							
Euca 300	3	0.624140	A	B						
Grev 300	3	0.602829		B	C					
Moll 300	3	0.596863			C					
Casu 300	3	0.561592				D				
Ficc 500	3	0.350722					E			
Casu 500	3	0.306833						F		
Grev 500	3	0.298426						F	G	
Euca 500	3	0.283034							G	H
Moll 500	3	0.273421								H

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

d. Cenizas totales:



- Análisis de Varianza

Fuente	GL	Adj SC	Adj CM	F-Valor	P-Valor
ESPECIE	4	470.601	117.650	3738.49	0.000
TEMPERATURA	1	22.934	22.934	728.75	0.000
ESPECIE*TEMPERATURA	4	104.472	26.118	829.93	0.000
Error	20	0.629	0.031		
Total	29	598.636			

Comparaciones para: CENIZAS (%)

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

ESPECIE	N	Promedio	Grupo			
Ficc	6	21.6900	A			
Casu	6	18.5767		B		
Euca	6	17.7217			C	
Moll	6	12.0033				D
Grev	6	11.4300				E

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

TEMPERATURA	N	Promedio	Grupo	
500	15	17.1587	A	
300	15	15.4100		B

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

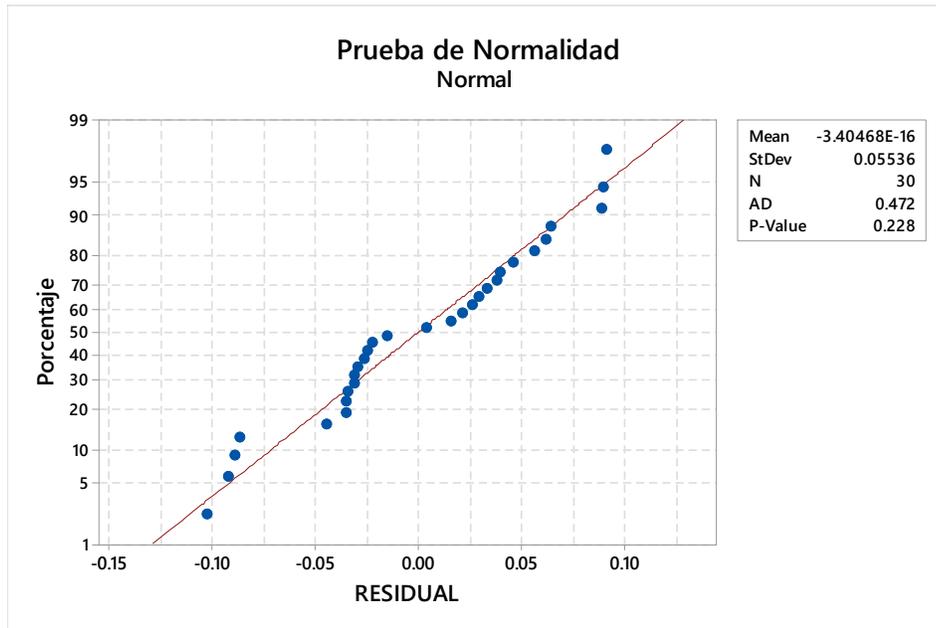
- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE*TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

ESPECIE*TEMPERATURA	N	Promedio	Grupo						
Ficc 500	3	25.7767	A						
Euca 300	3	19.3600		B					
Casu 500	3	19.1667		B					
Casu 300	3	17.9867			C				
Ficc 300	3	17.6033			C				
Euca 500	3	16.0833				D			
Grev 500	3	12.6500					E		
Moll 500	3	12.1167						F	
Moll 300	3	11.8900						F	
Grev 300	3	10.2100							G

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

e. Nitrógeno Total:



- Análisis de Varianza

Fuente	GL	Adj SC	Adj CM	F-Valor	P-Valor
ESPECIE	4	1.26367	0.315917	1444.65	0.000
TEMPERATURA	1	0.19931	0.199313	911.44	0.000
ESPECIE*TEMPERATURA	4	0.08452	0.021129	96.62	0.000
Error	20	0.00437	0.000219		
Total	29	1.55187			

Comparaciones para: N (%)

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

ESPECIE	N	Promedio	Grupo			
Casu	6	1.30932	A			
Moll	6	1.04288		B		
Ficc	6	0.82005			C	
Euca	6	0.79218				D
Grev	6	0.77362				D

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

TEMPERATURA	N	Promedio	Grupo	
300	15	1.02912	A	
500	15	0.86610		B

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

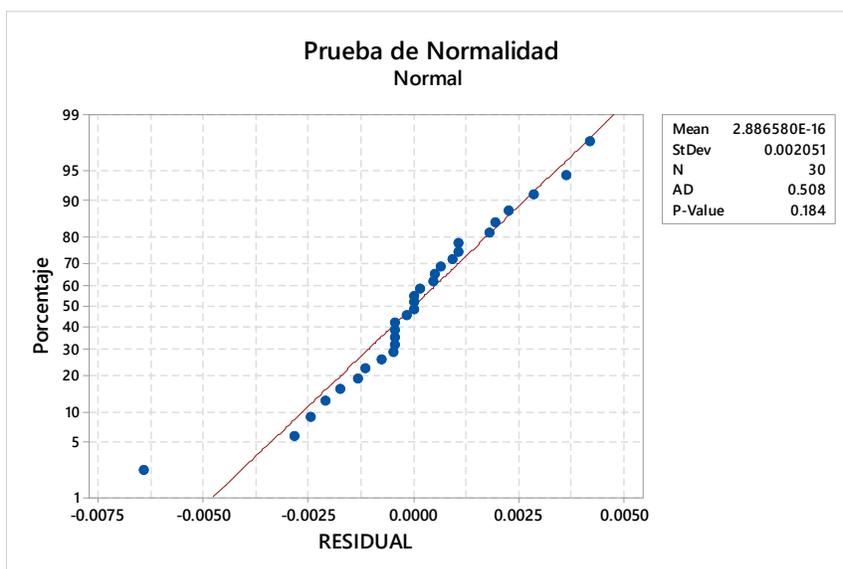
- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE*TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

ESPECIE*TEMPERATURA	N	Promedio	Grupo						
Casu 300	3	1.45170	A						
Casu 500	3	1.16693		B					
Moll 300	3	1.09673			C				
Moll 500	3	0.98902				D			
Ficc 300	3	0.93251					E		
Euca 300	3	0.89905					E		
Grev 500	3	0.78163						F	
Grev 300	3	0.76560						F	
Ficc 500	3	0.70759							G
Euca 500	3	0.68531							G

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

f. pH:



*Se ha ajustado a log (pH) por fines de normalidad.

- Análisis de Varianza

Fuente	GL	Adj SC	Adj CM	F-Valor	P-Valor
Especie	4	0.008713	0.002178	357.24	0.000
Temperatura	1	0.006657	0.006657	1091.81	0.000
Especie*Temperatura	4	0.002511	0.000628	102.94	0.000
Error	20	0.000122	0.000006		
Total	29	0.018002			

Comparaciones para: log pH

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

Especie	N	Promedio	Grupo			
Ficc	6	0.990132	A			
Euca	6	0.979809		B		
Moll	6	0.971400			C	
Casu	6	0.950313				D
Grev	6	0.945641				E

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

Temperatura	N	Promedio	Grupo	
500	15	0.982355	A	
300	15	0.952563		B

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

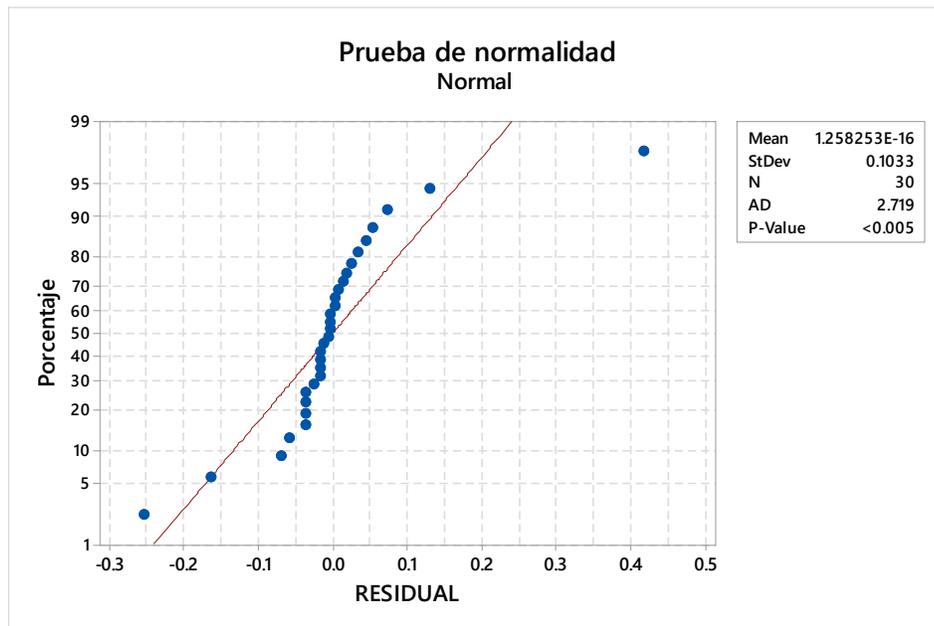
- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE*TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

Especie*Temperatura	N	Promedio	Grupo						
Ficc 500	3	1.00072	A						
Euca 500	3	0.98989		B					
Casu 500	3	0.98347		B	C				
Moll 500	3	0.98091			C				
Ficc 300	3	0.97955			C				
Euca 300	3	0.96973				D			
Moll 300	3	0.96189					E		
Grev 500	3	0.95678					E		
Grev 300	3	0.93450						F	
Casu 300	3	0.91715							G

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

g. Conductividad (dS/m)



- Análisis de Varianza

Fuente	GL	Adj SC	Adj CM	F-Valor	P-Valor
Especie	4	7.3646	1.84115	118.94	0.000
Temperatura	1	1.0792	1.07920	69.72	0.000
Especie*Temperatura	4	0.5262	0.13156	8.50	0.000
Error	20	0.3096	0.01548		
Total	29	9.2796			

Comparaciones para: Conductividad (mS/cm)

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

Especie	N	Promedio	Grupo			
Ficc	6	2.51500	A			
Grev	6	2.22167		B		
Moll	6	1.81667			C	
Euca	6	1.31000				D
Casu	6	1.25167				D

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

Temperatura	N	Promedio	Grupo	
500	15	2.01267	A	
300	15	1.63333		B

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

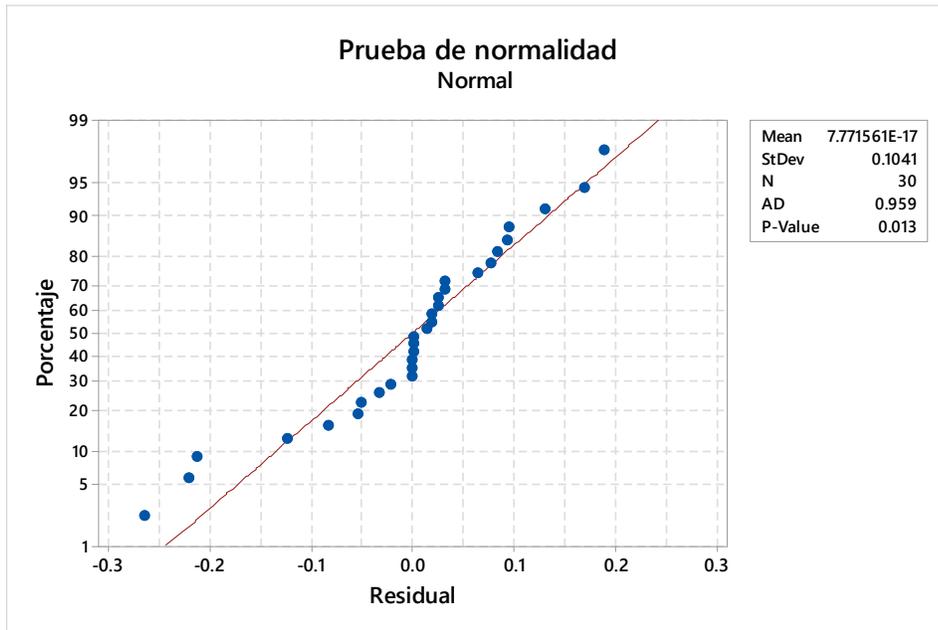
- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE*TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

Especie*Temperatura	N	Promedio	Grupo			
Ficc 500	3	2.76667	A			
Grev 500	3	2.42000	A	B		
Ficc 300	3	2.26333		B	C	
Moll 500	3	2.21667		B	C	
Grev 300	3	2.02333			C	
Moll 300	3	1.41667				D
Euca 500	3	1.35333				D
Casu 500	3	1.30667				D
Euca 300	3	1.26667				D
Casu 300	3	1.19667				D

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

h. Carbonatos $\%(\text{CO}_3)_2^-$:



- Análisis de Varianza

Fuente	GL	Adj SC	Adj CM	F-Valor	P-Valor
Especie	4	4.8561	1.21403	77.20	0.000
Temperatura	1	5.3594	5.35942	340.80	0.000
Especie*Temperatura	4	2.5202	0.63004	40.06	0.000
Error	20	0.3145	0.01573		
Total	29	13.0502			

Comparaciones para: $\log (\%(\text{CO}_3)_2^-)$

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

Especie	N	Promedio	Grupo
Moll	6	0.795578	A
Ficc	6	0.758366	A
Casu	6	0.487531	B
Euca	6	0.069468	C
Grev	6	-0.241028	D

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

Temperatura	N	Promedio	Grupo	
500	15	0.796650	A	
300	15	-0.048684		B

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

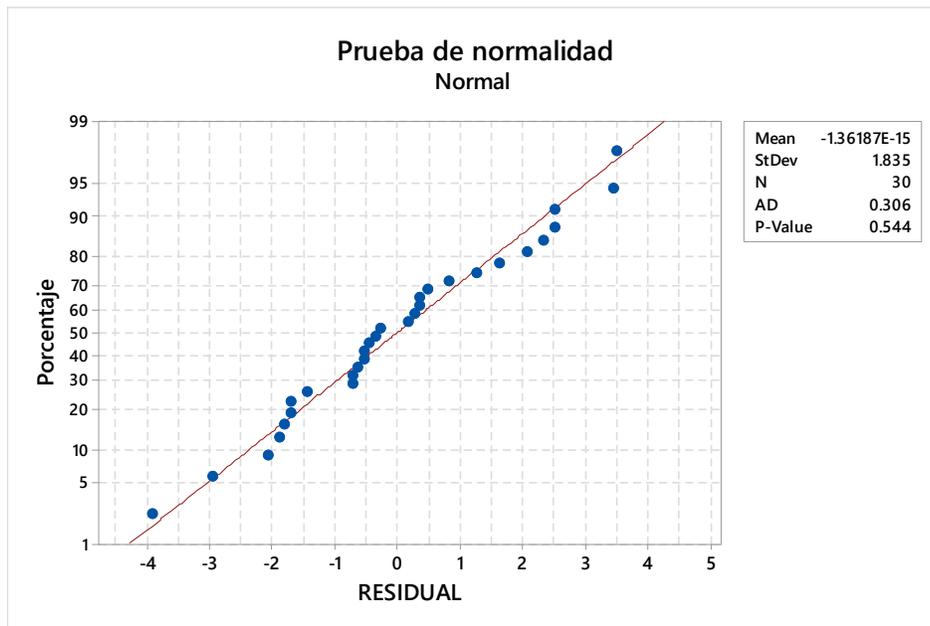
- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE*TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

Especie*Temperatura	N	Promedio	Grupo					
Moll 500	3	1.02652	A					
Ficc 300	3	0.85615	A	B				
Casu 500	3	0.80345	A	B	C			
Ficc 500	3	0.73501	A	B	C			
Moll 300	3	0.66559	A	B	C			
Euca 300	3	0.63155		B	C			
Grev 300	3	0.49021			C	D		
Casu 300	3	0.17161				D		
Euca 500	3	-0.49261					E	
Grev 500	3	-1.14764						F

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

i. **Carbono lábil (%)**



- **Análisis de Varianza**

Fuente	GL	Adj SC	Adj CM	F-Valor	P-Valor
ESPECIE	4	383.92	95.979	19.66	0.000
TEMPERATURA	1	203.68	203.682	41.72	0.000
ESPECIE*TEMPERATURA	4	99.81	24.952	5.11	0.005
Error	20	97.64	4.882		
Total	29	785.05			

Comparación para Carbono lábil (%)

- **Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE**

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

Especie	N	Promedio	Grupo		
Ficc	6	18.2374	A		
Grev	6	13.2457		B	
Moll	6	12.7510		B	
Casu	6	8.7037			C
Euca	6	8.4655			C

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

Temperatura	N	Promedio	Grupo	
300	15	14.8863	A	
500	15	9.6750		B

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

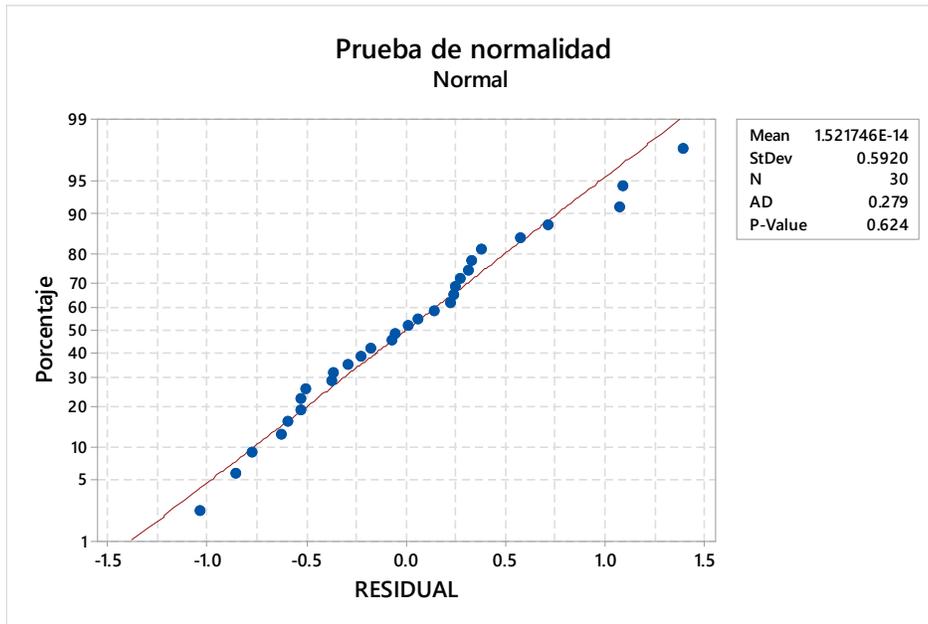
- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE*TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

Especie*Temperatura	N	Promedio	Grupo				
Ficc 300	3	21.7452	A				
Grev 300	3	18.9570	A	B			
Ficc 500	3	14.7297		B	C		
Moll 300	3	13.2907		B	C	D	
Moll 500	3	12.2114			C	D	E
Casu 300	3	10.2327			C	D	E
Euca 300	3	10.2061			C	D	E
Grev 500	3	7.5344				D	E
Casu 500	3	7.1747				D	E
Euca 500	3	6.7249					E

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

j. **Carbono oxidable (%)**



- **Análisis de Varianza**

Fuente	GL	Adj SC	Adj CM	F-Valor	P-Valor
ESPECIE	4	140.09	35.02	68.92	0.000
TEMPERATURA	1	1452.41	1452.41	2858.09	0.000
ESPECIE*TEMPERATURA	4	15.71	3.93	7.73	0.001
Error	20	10.16	0.51		
Total	29	1618.38			

Comparisons for Carbono oxidable (%)

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

Especie	N	Promedio	Grupo			
Euca	6	26.1250	A			
Casu	6	24.0000		B		
Ficc	6	22.0650			C	
Moll	6	20.8467			C	D
Grev	6	20.2300				D

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

Temperatura	N	Promedio	Grupo	
300	15	29.6113	A	
500	15	15.6953		B

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

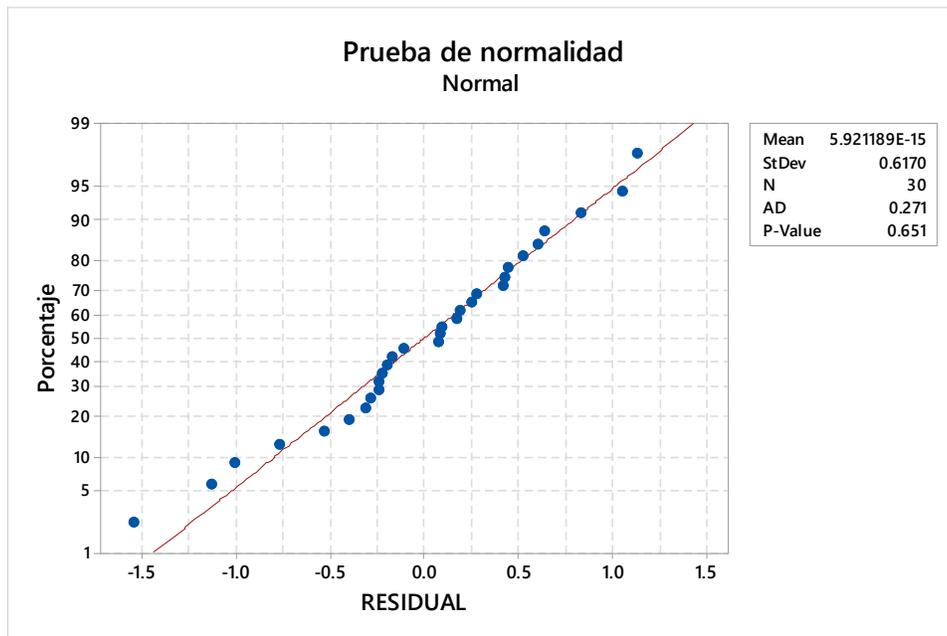
- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE*TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

Especie*Temperatura	N	Promedio	Grupo					
Euca 300	3	34.0967	A					
Casu 300	3	29.9500		B				
Ficc 300	3	28.4900		B	C			
Moll 300	3	28.3433		B	C			
Grev 300	3	27.1767			C			
Euca 500	3	18.1533				D		
Casu 500	3	18.0500				D		
Ficc 500	3	15.6400					E	
Moll 500	3	13.3500						F
Grev 500	3	13.2833						F

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

k. Carbono recalcitrante (%)



- Análisis de Varianza

Fuente	GL	Adj SC	Adj CM	F-Valor	P-Valor
ESPECIE	4	857.30	214.32	388.28	0.000
TEMPERATURA	1	1062.19	1062.19	1924.31	0.000
ESPECIE*TEMPERATURA	4	169.89	42.47	76.94	0.000
Error	20	11.04	0.55		
Total	29	2100.42			

Comparisons for Carbono Recalcitrante(%)

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

Especie	N	Promedio	Grupo			
Grev	6	64.8650	A			
Moll	6	63.3550		B		
Casu	6	54.2117			C	
Euca	6	53.0867			C	D
Ficc	6	52.5867				D

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

Temperatura	N	Promedio	Grupo	
500	15	63.5713	A	
300	15	51.6707		B

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

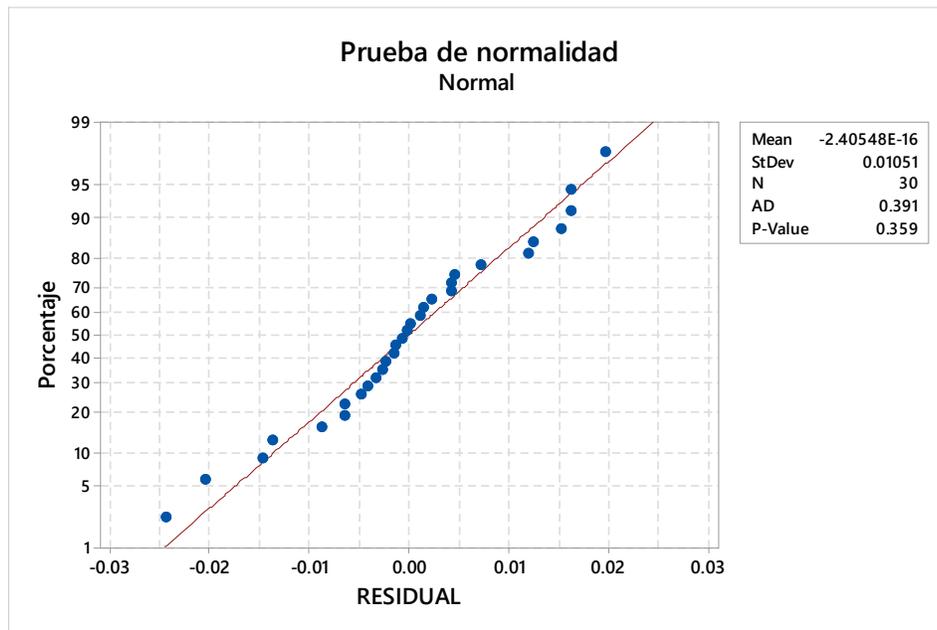
- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE*TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

Especie*Temperatura	N	Promedio	Grupo						
Grev 500	3	70.8233	A						
Moll 500	3	70.4100	A						
Euca 500	3	62.4900		B					
Casu 500	3	59.4200			C				
Grev 300	3	58.9067			C				
Moll 300	3	56.3000				D			
Ficc 500	3	54.7133				D			
Ficc 300	3	50.4600					E		
Casu 300	3	49.0033					E		
Euca 300	3	43.6833							F

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

I. Grado de estabilidad (%)



- Análisis de Varianza

Fuente	GL	Adj SC	Adj CM	F-Valor	P-Valor
ESPECIE	4	0.012677	0.003169	19.80	0.000
TEMPERATURA	1	0.077405	0.077405	483.54	0.000
ESPECIE*TEMPERATURA	4	0.006510	0.001628	10.17	0.000
Error	20	0.003202	0.000160		
Total	29	0.099794			

Comparación para Grado de Estabilidad (%)

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

Especie	N	Promedio	Grupo			
Moll	6	0.869243	A			
Grev	6	0.855773	A	B		
Ficc	6	0.838983		B	C	
Casu	6	0.832815			C	
Euca	6	0.808967				D

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

- Método de Tukey para comparaciones múltiples: TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

Temperatura	N	Promedio	Grupo	
500	15	0.891951	A	
300	15	0.790361		B

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

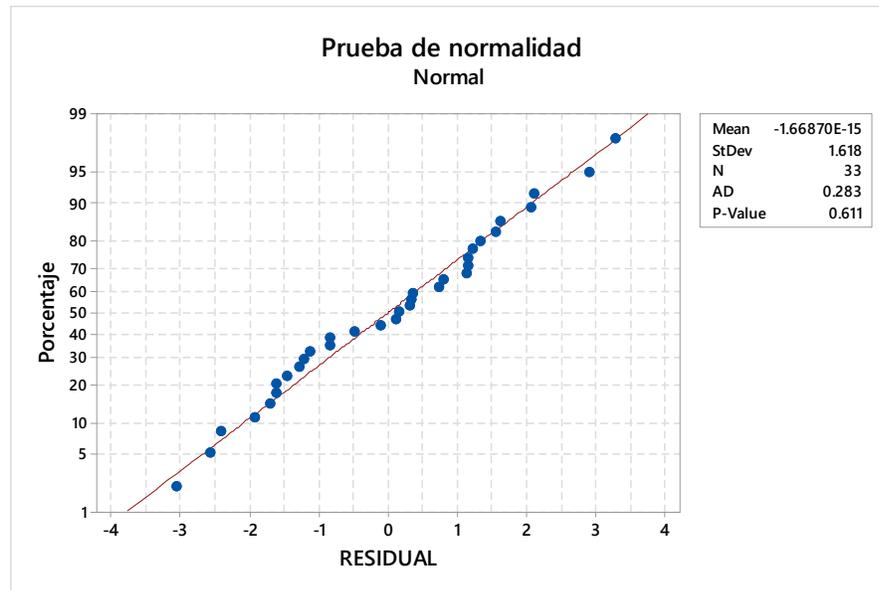
- Método de Tukey para comparaciones múltiples: ESPECIE*TEMPERATURA

(Agrupando información usando el Método de Tukey a un 95 por ciento de confiabilidad)

Especie*Temperatura	N	Promedio	Grupo				
Moll 500	3	0.921411	A				
Casu 500	3	0.890710	A	B			
Grev 500	3	0.888907	A	B			
Euca 500	3	0.882777		B			
Ficc 500	3	0.875950		B			
Grev 300	3	0.822638			C		
Moll 300	3	0.817074			C		
Ficc 300	3	0.802016			C	D	
Casu 300	3	0.774919				D	
Euca 300	3	0.735158					E

Los promedios que no comparten una letra son significativamente diferentes

J. Prueba respirométrica:



- Análisis de Varianza

Fuente	GL	Adj SC	Adj CM	F-Valor	P-Valor
Especie	5	68.72	13.744	4.43	0.004
Error	27	83.82	3.104		
Lack-of-Fit	5	60.04	12.007	11.11	0.000
Pure Error	22	23.78	1.081		
Total	32	152.54			

- Comparación de AT4

Comparación múltiple de Dunnet con un Control: Especie

(Agrupando información usando el Método de Dunnet a un 95 por ciento de confiabilidad)

Especie	N	Mean	Grouping
Suelo (Control)	3	1.77672	A
Grev	6	6.05701	
Euca	6	5.98813	
Ficc	6	4.36523	A
Moll	6	4.02455	A
Casu	6	2.78622	A

Promedios no etiquetados con letra A son significativamente diferentes al control.