

UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS**FACULTAD DE INGENIERÍAS****ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL****TESIS**

**EFICIENCIA DE DIFERENTES DOSIS DE BIOCHAR PARA REMEDIAR LA
ACIDIFICACIÓN DEL SUELO AGRÍCOLA, EN INVERNADERO, PUNO, 2019**

PRESENTADA POR:

BETSY TICONA ENCINAS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

PUNO – PERÚ

2022



Repositorio Institucional ALCIRA by [Universidad Privada San Carlos](#) is licensed under a [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional License](#).

UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS

**EFICIENCIA DE DIFERENTES DOSIS DE BIOCHAR PARA REMEDIAR LA
ACIDIFICACIÓN DEL SUELO AGRÍCOLA, EN INVERNADERO, PUNO, 2019**

PRESENTADA POR:

BETSY TICONA ENCINAS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO

PRESIDENTE:

: 
Mg. ELVIRA ANANI DURAND GOYZUETA

PRIMER MIEMBRO:

: 
Dr. ESTEBAN ISIDRO LEON APAZA

SEGUNDO MIEMBRO:

: 
MSc. JOSE ELADIO NUÑEZ QUIROGA

ASESOR DE TESIS:

: 
M. Sc. JULIO WILFREDO CANO OJEDA

Área: Ingeniería y Tecnología

Disciplina: Biorremediación en el Manejo Ambiental

Especialidad: Biorremediación

Puno, 15 de Junio de 2022.

DEDICATORIA

A Dios, Padre Todopoderoso, por haberme brindado y regalado el don de la vida, por este momento tan especial, por ser mi fuerza y mi guía que conduce mi camino.

A mis amados padres, Hugo Ticona Maquera y Nancy Encinas Roque, por los valores inculcados que contribuye la mejor herencia, por ser mi inspiración y fortaleza para alcanzar mis metas, por todo el esfuerzo que realizaron para mi formación profesional, sin ellos no hubiera sido posible.

A mi querida hermanita, Yoselin Ticona Encinas, por todos los momentos compartidos, y recordar siempre que en la vida no hay límites, solamente los que uno se impone.

A mis queridos abuelos quienes esperan que sea una gran profesional, abuelos se dio un gran paso, a seguir por más.

A todas las personas que fueron parte de mi vida profesional.

Betsy Ticona Encinas

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Privada San Carlos de Puno, en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, por acogerme en sus aulas durante los años de estudio.

A la plana de docentes, por los conocimientos impartidos durante mi carrera universitaria.

Al proyecto PP 0089 Reducción de la Degradación de Suelos Agrarios, por financiar gran parte de esta investigación.

A los ingenieros Jorge Canihua Rojas y Selima Milagros Salcedo Mayta por su amistad y apoyo en la realización del presente trabajo.

Al ingeniero Julio Wilfredo Cano Ojeda, por las sugerencias dadas durante la elaboración y revisión del presente trabajo de investigación.

A los miembros del Honorable Jurado, por las observaciones sugeridas para la mejora del trabajo de investigación:

Mg. Elvira Anani Durand Goyzueta

Dr. Esteban Isidro Leon Apaza

MSc. Jose Eladio Nuñez Quiroga.

Finalmente agradecer a todas aquellas personas que conocí durante la ejecución de mi investigación, quienes de forma directa e indirecta hicieron que concluya el presente trabajo de investigación.

Betsy Ticona Encinas

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE ANEXOS	10
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN	13

CAPÍTULO I**PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA
INVESTIGACIÓN**

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.2. ANTECEDENTES	17
1.3. OBJETIVOS	22

CAPÍTULO II**MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

2.1. MARCO TEÓRICO	24
---------------------------	-----------

2.1.1. ACIDIFICACIÓN DEL SUELO	24
2.1.1.1. Fuentes de la acidificación del suelo	24
2.1.1.2. Efectos de la acidificación del suelo	26
2.1.1.3. Toxicidad de aluminio	27
2.1.1.4. pH del suelo	28
2.1.2. BIOCHAR	30
2.1.2.1. Beneficios del biochar	30
2.1.2.2. Producción del biochar	32
2.1.3. CULTIVO DE PRUEBA	32
2.2. MARCO CONCEPTUAL	33
2.3. HIPÓTESIS	35

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. ZONA DE ESTUDIO	36
3.2. TAMAÑO DE MUESTRAS	36
3.2.1. Población	36
3.2.2. Muestra	37
3.3. MÉTODO Y TÉCNICAS	38
3.3.1. Características de la distribución experimental	38
3.3.2. Conducción de experimento	39
3.4. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES	40
3.5. MÉTODO O DISEÑO ESTADÍSTICO	41
3.5.1. Prueba de normalidad y homogeneidad de varianzas	42

CAPÍTULO IV**EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

4.1. OBJETIVO 1. EFICIENCIAS DE LAS DIFERENTES DOSIS DE BIOCHAR EN LA REMEDIACIÓN DE LA ACIDEZ DEL SUELO AGRÍCOLA	43
4.1.1. Eficiencias de la reacción de suelo (pH)	45
4.1.2. Eficiencias del porcentaje de aluminio intercambiable (Al)	47
4.1.3. Eficiencias de la conductividad eléctrica del suelo (CE)	49
4.2. OBJETIVO 2. EFECTO DE LAS DIFERENTES DOSIS DE BIOCHAR EN EL CULTIVO DE PRUEBA AVENA (<i>Avena sativa</i> L.)	51
4.2.1. Productividad de la materia verde de la avena	51
CONCLUSIONES	53
RECOMENDACIONES	55
BIBLIOGRAFÍAS	56
ANEXO	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01. Términos descriptivos del pH de los suelos y sus efectos esperables en cada intervalo.	29
Tabla 02. Análisis físico químico del suelo agrícola en estudio.	37
Tabla 03. Identificación de tratamientos y el empleo de la cantidad dosis de biochar por tratamiento.	38
Tabla 04. Descripción de las características del experimento.	39
Tabla 05. Resultados de análisis de varianza para las variables en estudio “reacción del suelo (pH), porcentaje de aluminio intercambiable (Al), materia orgánica (MO), conductividad eléctrica del suelo (CE), porcentaje de calcio intercambiable (Ca) y magnesio intercambiable (Mg)”.	43
Tabla 06. Comparación múltiple de Dunnett ($p \leq 0.05$) para la eficiencia de la reacción del suelo (pH).	45
Tabla 07. Comparación múltiple de Dunnett ($p \leq 0.05$) para la eficiencia del porcentaje de aluminio intercambiable (Al).	47
Tabla 08. Comparación múltiple de Dunnett ($p \leq 0.05$) para la eficiencia de la conductividad eléctrica del suelo.	49
Tabla 09. Comparación múltiple de Dunnett ($p \leq 0.05$) para la materia verde de la avena.	51
Tabla 10. Análisis de varianza para la reacción del suelo (pH), porcentaje de aluminio intercambiable (Al), materia orgánica (MO) y materia verde de la avena (MV).	67
Tabla 11. Análisis de varianza para la conductividad eléctrica del suelo (CE).	67
Tabla 12. Análisis de varianza para el porcentaje de calcio intercambiable (Ca^{++}).	68

Tabla 13. Análisis de varianza para el porcentaje de magnesio intercambiable
(Mg⁺⁺). 68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01. Comportamiento del aluminio en relación al pH del suelo.	27
Figura 02. Distribución experimental	39
Figura 03. Representación gráfica de medias para el pH del suelo	46
Figura 04. Representación gráfica de medias para porcentaje de aluminio intercambiable	48
Figura 05. Representación gráfica de medias para la conductividad eléctrica del suelo	50
Figura 06. Correlación de Pearson entre el pH del suelo y la productividad de la materia verde de la avena	52
Figura 07. Certificado de análisis de suelo inicial	64
Figura 08. Certificado de análisis de suelo final 01	65
Figura 09. Certificado de análisis de suelo final 02	66
Figura 10. Estación Experimental Agraria Illpa, anexo Salcedo - Puno	69
Figura 11. Estación Experimental Agraria Illpa, anexo Tahuaco - Puno	69
Figura 12. Obtención de las muestras para el estudio experimental	70
Figura 13. Tallo de quinua (<i>Chenopodium quinoa</i> Willd) materia prima para la elaboración del biochar	70
Figura 14. Biochar a partir de tallos de quinua (<i>Chenopodium quinoa</i> Willd)	71
Figura 15. Biochar	71
Figura 16. Instalación de las unidades experimentales.	72
Figura 17. Cultivo de prueba en fase fenológica tercera hoja	72
Figura 18. Crecimiento del cultivo de prueba (avena)	73
Figura 19. Cultivo de prueba avena fase grano lechoso (RI)	73
	8

Figura 20. Cultivo de prueba avena fase grano lechoso (RII)	74
Figura 21. Cultivo de prueba avena fase grano lechoso (RIII)	74
Figura 22. Raíces del cultivo de prueba	75
Figura 23. Efectos del aluminio en la planta con la aplicación de biochar y sin biochar	76

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 01. Matriz de consistencia	63
Anexo 02. Certificados de análisis de suelos	64
Anexo 03. Análisis de varianza	67
Anexo 04. Panel fotográfico	69

RESUMEN

Esta investigación se llevó a cabo en el invernadero de la Estación Experimental Agraria Illpa INIA anexo Salcedo, Puno, en el área de laboratorio de análisis de aguas y suelos. El objetivo fue determinar la eficiencia de las diferentes dosis de biochar para remediar la acidez del suelo agrícola de la Estación Experimental Illpa INIA anexo Tahuaco. Para ello, se aplicó el diseño experimental completamente al azar (DCA) que consta de 7 tratamientos con dosificaciones de (0, 0.5, 1, 2, 4, 8 y 16%) y 3 repeticiones, con un total de 21 unidades experimentales. Se realizaron las pruebas de comparación múltiple de medias de Dunnett al 95% de confianza. Los datos de las variables de respuesta se procesaron con el software SAS 9.4 (System Analyzer Statistic). Los resultados fueron: a) El biochar de tallos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) fue eficiente para remediar la acidez del suelo agrícola; la mejor eficiencia se dio con el tratamiento T3 (biochar 2%), tomando en consideración la reacción del suelo (pH) donde aumentó en 1.40, la saturación de aluminio intercambiable (Al^{+++}) en el complejo coloidal fue sustituido por otros cationes y precipitado en su totalidad (0,00%), y la conductividad eléctrica (CE) del suelo aumentó en 1,38 mmhos/cm; además, estadísticamente, el biocarbón no influyó en la saturación de calcio intercambiable (Ca^{++}), magnesio (Mg^{++}) y materia orgánica (MO). b) El biochar tuvo efecto neutralizante en la acidez del suelo, por lo tanto, los tratamientos T3 (biochar 2%) y T4 (biochar 4%) presentaron mayor productividad de la materia verde de la avena (*Avena sativa* L.) de 17.84 y 17.89 t ha⁻¹ respectivamente.

Palabras claves: biochar, acidez, suelo, remediación.

ABSTRACT

This research was carried out in the greenhouse of the Illpa INIA Agricultural Experimental Station, Salcedo annex, Puno, in the water and soil analysis laboratory area. The objective was to determine the efficiency of the different doses of biochar to remedy the acidity of the agricultural soil of the Illpa INIA Tahuaco Experimental Station Annex. For this, the completely randomized experimental design (DCA) was applied, consisting of 7 treatments with dosages of (0, 0.5, 1, 2, 4, 8 and 16%) and 3 repetitions, with a total of 21 units experimental. Multiple comparison tests of Dunnett's means at 95% confidence were performed. The data of the response variables were processed with the SAS 9.4 software (System Analyzer Statistic). The results were: a) The biochar from quinoa stems (*Chenopodium quinoa* Willd) was efficient to remedy the acidity of agricultural soil; the best efficiency was given with the T3 treatment (biochar 2%), taking into consideration the soil reaction (pH) where it increased by 1.40, the saturation of exchangeable aluminum (Al^{+++}) in the colloidal complex was replaced by other cations and precipitated in its totality (0.00%), and the electrical conductivity (EC) of the soil increased by 1.38 mmhos/cm; furthermore, statistically, biochar did not influence the saturation of exchangeable calcium (Ca^{++}), magnesium (Mg^{++}) and organic matter (OM). b) The biochar had a neutralizing effect on the acidity of the soil, therefore, the treatments T3 (biochar 2%) and T4 (biochar 4%) presented higher productivity of the green matter of oats (*Avena sativa* L.) of 17.84 and 17.89 t ha⁻¹ respectively.

Keywords: biochar, acidity, soil, remediation.

INTRODUCCIÓN

El suelo es el principal recurso natural que tiene la humanidad para la producción de alimentos, en el que el 95% de la producción de alimentos depende de este recurso no renovable, pero solo los suelos en buen estado de calidad pueden prestar los servicios ecosistémicos necesarios y asegurar el abastecimiento de alimento; sin embargo, actualmente los suelos presentan problemas de degradación como la acidificación (Rodríguez *et al.*, 2019).

La acidificación de los suelos es uno de los mayores limitantes para la agricultura, debido a que en el mundo aproximadamente el 50% de los suelos potencialmente cultivables presentan este problema, los principales limitantes de estos suelos son los niveles tóxicos de aluminio y manganeso (Kochian *et al.*, 2004; Rivera *et al.*, 2016).

Las altas concentraciones de aluminio inhiben la absorción de nutrientes esenciales para el adecuado desarrollo de las plantas, afecta en la fertilidad del suelo y por ende la productividad (Castro, 2010), una producción baja volatiliza el precio de los alimentos y como consecuencia sumiría potencialmente a millones de personas en el hambre y la pobreza (Rodríguez *et al.*, 2019).

Para solucionar este problema se han estudiado diversos enfoques como la aplicación de cal, roca fosfórica, materia orgánica y fitorremediación, sin embargo, estos métodos pueden llevar una cantidad considerable de tiempo y dinero, por lo que es esencial buscar una solución de bajo costo, a largo plazo y ecológica (Shetty *et al.*, 2021).

El biochar es un producto obtenido de la descomposición térmica de material orgánico a temperaturas bajas de 1200°C, tiene un valor potencial para mejorar las propiedades del

suelo y reducir los peligros causados por la acidificación del suelo (Dai et al., 2017; Lehmann & Joseph, 2015).

Considerando la problemática, el presente trabajo tiene como fin evaluar la eficiencia de las diferentes dosis de biochar en la remediación del suelo ácido agrícola. Para cumplir ese fin la estructura del presente trabajo de investigación se ha dividido en cuatro partes principales.

En el primer capítulo se hace referencia al planteamiento de la problemática y la formulación del problema. Así como la revisión de investigaciones vinculadas al tema y de la diversa literatura local, nacional y extranjera, relacionadas con las variables que son motivo de estudio, así como también la descripción de los objetivos.

El segundo capítulo está referido al marco teórico que contiene los conceptos más importantes que ayudarán a comprender este problema, y la descripción de las hipótesis de la investigación.

El tercer capítulo está referido a la metodología de trabajo que se utilizó, los instrumentos que se aplicaron y las variables de estudio.

En el cuarto capítulo se presentan y describen, en tablas e histogramas, los datos que se encontraron, producto de los análisis estadísticos correspondientes.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La acidificación del suelo es uno de los principales pilares de la degradación del suelo (Pennock & Mckenzie, 2016), en el mundo aproximadamente el 30% de la superficie agrícola, y el 50% de la superficie potencial arable está formada por ello; de esta cifra, 41% se encuentra en América, 26% en Asia, 17% en África, 10% en Europa, y 6% en Oceanía (Rivera *et al.*, 2016).

De acuerdo a investigaciones de Rivera *et al.* (2016), América presenta mayor porcentaje de acidificación en los suelos agrícolas. Así mismo, Jaramillo (2002), menciona que más de 85% de suelos colombianos presenta problemas de acidificación.

En el Perú se estima que más del 60% de su área total tiene condiciones climáticas tropicales, donde predominan los suelos ácidos minerales, como los ultisoles y los oxisoles; en cambio, en zonas templadas, los suelos ácidos son predominantemente orgánicos como, los espodosoles, alfisoles, inceptisoles e histosoles (Arcos & Narro, 2009).

Los suelos agrícolas de la estación experimental agraria Illpa anexo Tahuaco, del departamento de Puno, presentan problemas de acidificación, de acuerdo a los estudios realizados por Canihua (1996) indica que dichos suelos tienen pH que varía entre 4.5 y 5.5 interpretándose como suelos fuertemente ácido a moderadamente ácidos.

Este problema se presenta debido a diferentes factores antrópicos y naturales como, la lluvia ácida, el uso masivo de fertilizante nitrogenados, práctica de uso de suelo eliminando los rastrojos de cosecha, adsorción de bases intercambiables por las plantas y la no reposición de nutrientes, meteorización de los minerales primarios y secundarios (Zapata, 2004; Loayza, 2020).

Este problema que se está identificando podría tener consecuencias graves sobre la fertilidad del suelo agrícola, y por ende, la seguridad alimentaria, considerando que el 95% de los alimentos provienen del suelo; además, una producción baja, incrementa la volatilidad de los precios de alimentos, y sumiría potencialmente a millones de personas en el hambre y la pobreza (Rodríguez *et al.*, 2019).

Es por ello que la presente investigación, busca remediar la acidificación en el suelo agrícola, planteándose aplicar proporciones crecientes de biochar, con la finalidad de evaluar el efecto en la acidez. Puesto que, el biochar es considerado una de las enmiendas orgánicas con gran potencial para mejorar la fertilidad física, química y biológica de los suelos, además de ser una alternativa sostenible (Martínez, 2015).

1.1.1. PROBLEMA GENERAL

¿Cómo será la eficiencia de las diferentes dosis de biochar en la remediación de suelos agrícolas ácidos bajo invernadero - Puno 2019?

1.1.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- a) ¿Qué dosis de biochar será más eficiente para remediar la acidez del suelo agrícola bajo invernadero?
- b) ¿Cómo será el efecto de las diferentes dosis de biochar en el cultivo de prueba bajo invernadero?

1.2. ANTECEDENTES

1.2.1. A NIVEL INTERNACIONAL

Gilces (2014), en su investigación “Efectos de la aplicación de biochar y cenizas en las propiedades del suelo”, España. Aplicó dos enmiendas (biochar y ceniza) a tres tipos de suelos (ácidos, neutros y alcalinos), en dosis de 0,75 y 1,5%. Concluyó que el biochar presentó mejores resultados en suelos ácidos y neutros debido al efecto alcalinizante, en el que registró incrementos de pH de 4,8 a 5,1 y 5,4 en suelos ácidos, y de 7,6 a 8,1 y 8,4 en suelos neutros; además, con la adición del biochar mejoró la germinación y crecimiento del tallo, sobre todo en el suelo ácido.

Martínez (2015), en su tesis “Efectos de enmiendas de biochar sobre el desarrollo en *Cucumis sativus* L. cv SMR-58”, Mexico. Empleo diferentes dosis de biochar (5, 10 y 20%) en suelos franco arenosas, utilizando biomas de álamo, olote y agave para la producción de biochar, obteniendo mejores resultados en el biochar de agave puesto que incrementó notablemente las siguientes propiedades químicas del suelo: pH de 5,9 a 7,0, 7,9 y 8,0, MO% de 0,72 a 1,59, 1,92, 1,95, K(mg/100g) de 0,53 a 0,57, 0,58 y 0,42, Na(mg/100g) de 0,045 a 0,103, 0,172 y 0,044, Ca(mg/100g) de 1,143 a 2,503, 5,340 y 11,262, Mg(mg/100g) de 0,137 a 0,162, 0,187 y 0,138, CIC(mg/100g) de 8,4 a 9,8, 8,8 y 9,6. Concluyendo que el biochar influye directamente en la fertilidad del suelo.

Olmo (2016), en su tesis “Efectos del biochar sobre el suelo, las características de la raíz y la producción vegetal” España, tiene como finalidad evaluar los diferentes rasgos funcionales de la planta y los cambios inducidos con la aplicación del biochar. Para ello, empleó diferentes tipos de biochar. Los resultados indicaron que las características de los biochars variaron de acuerdo al material empleado en la producción; presentaron alto contenido de C, pH alcalino y bajo contenido de nutrientes; en cuanto al suelo, el biochar mejoró las propiedades fisicoquímicas del suelo, aumentó el crecimiento y la producción en los cultivos.

Fiallos *et al.* (2015), en su investigación “Restauración ecológica del suelo aplicando biochar (carbón vegetal), y su efecto en la producción de *Medicago sativa*” Colombia, aplicó diferentes niveles de carbón vegetal (10, 20, y 30 t.ha⁻¹) donde obtuvieron mejores resultados al aplicar 30 t.ha⁻¹ puesto que, mejoró la producción forrajera de alfalfa *Medicago sativa*; así mismo, la adición de biochar mejoró las propiedades del suelo como el N aumentó de 0,09 a 0,11%, MO de 0,7 a 1,8% y pH de 4,7 a 6,3.

Alonso *et al.* (2016), en su investigación “Biochar como enmienda en un oxisol y su efecto en el crecimiento de maíz” Colombia. Enmendó con diferentes dosis de biochar de cuesco de palma africana (0, 2, 5 y 10%), pirolizado a 350°C durante 80 minutos. Obtuvo resultados de incrementos en fósforo (1,20, 2,90, 2,90 y 10,60 ppm), calcio (0,30, 0,40, 0,40 y 0,80 meq/100g), magnesio (0,01, 0,05, 0,30 y 0,20 meq/100g), potasio (0,07, 0,21, 0,47 y 0,77 meq/100g), y una disminución proporcional de aluminio intercambiable (1,50, 1,45, 0,80, y 0,40 meq/100g) al aplicarse el biochar. Concluye que el biochar mejoró algunas propiedades del suelo, sin embargo no aumentó el nitrógeno esencial para el crecimiento de las plantas, pero puede ser una alternativa para corregir la acidez del suelo y ser sumidero de carbono a largo plazo.

Concilco *et al.* (2018), en su investigación “Influencia del biocarbón aplicado al suelo sobre atributos de rendimiento y calidad de avena forrajera”, México. Empleo biocarbón elaborado con biomasa de bambú. Obteniendo mejores resultados en materia verde al aplicar 2,25Mg/ha + fertilización convencional en comparación del tratamiento que solo empleo fertilización convencional. Concluye que el biochar influye positivamente en el rendimiento de la avena forrajera.

Dominchin *et al.* (2019), en su investigación “Efecto de la aplicación de biochar avícola sobre las propiedades químicas y microbiológicas de un suelo haplustol típico con diferentes intensidades de uso”, Argentina. Evaluó el efecto de la aplicación de diferentes dosis de biochar a partir de excretas avícolas (0,1, 3 y 10%), en tres suelo con diferente intensidad de uso como el suelo prístino forestal (SP), suelo agrícola bajo manejo sustentable (MS), y suelo agrícola bajo laboreo intenso (LI). La aplicación de biochar incrementó el pH (5,85, 6,75, 7,38, 8,38) en LI, la conductividad eléctrica (CE) (0,21, 0,44, 0,82, 2,06) en LI, el carbono orgánico total (COT) (21,14, 21,19, 23,48, 25,97) en LI, y la relación C/N (11,01, 11,06,11,83, 12,52) en LI; asimismo, las altas concentraciones de biochar causaron un incremento de la actividad microbiana total en los suelos agrícolas, además de actinobacterias y hongos micorrícicos. Concluyendo que la aplicación de biochar podría ser de mayor utilidad en la recuperación de suelos con alto grado de degradación edáfica.

Kannan *et al.* (2021), en su artículo “La aplicación de biochar y fosfobacterias mejora el crecimiento y el rendimiento de *Vigna mungo* L. en suelos ácidos al aumentar el pH del suelo, el contenido de humedad, el crecimiento microbiano y la disponibilidad de fósforo”, India. Aplicó 5 t h⁻¹ de biochars de madera de *Cajanus cajan* L. y *Acacia holosericea* A.Cunn. ex G.Don, a un proceso de pirólisis lenta (350 – 400 °C), el estudio se realizó por un periodo de 3 años; en el que, el pH incrementó de 5,75 a 6,38 y 6,21 gracias a la

naturaleza alcalina del biochar, además, la presencia de grupos hidroxilo y carboxilo, facilitó la precipitación del Al intercambiable como hidróxidos de Al insoluble de 3,2 a 2,10 y 2,10 meq/100g, así mismo, la naturaleza porosa del biochar proporcionó un entorno ideal para el crecimiento microbiano del suelo al optimizar la humedad del suelo y la temperatura, el incremento de actividad microbiana solubiliza las formas de P insolubles y libera el P disponible, además, el biochar protege al P de la precipitación, de la misma manera actuó en los demás nutrientes, mejorando su disponibilidad. Estas mejoras positivas en las condiciones del suelo permitieron que el grano negro produjera una mayor biomasa y rendimiento.

Shetty *et al.* (2021), en su investigación “Toxicidad del aluminio en plantas y su posible mitigación en suelos ácidos por biocarbón: una revisión”. Luego de revisar diferentes artículos concluye que, el efecto del biocarbón sobre la toxicidad del Al depende de su tasa de aplicación, el tipo de materia prima, su composición y la temperatura de pirólisis; además, la toxicidad del aluminio se reduce tanto por la alcalinidad del biocarbón como por su capacidad de adsorción y precipitación debido a sus grupos funcionales y la presencia de cationes básicos.

Nguyen *et al.* (2021), en su investigación, “Los efectos del biocarbón en el rendimiento de biomasa del pasto elefante (*Pennisetum Purpureum* Schumach) y las propiedades de los suelos ácidos”, Vietnam. Evaluó los efectos del biocarbón derivado de la cáscara del café en el rendimiento de la hierba y las propiedades del suelo. El experimento se desarrolló bajo invernadero en macetas, trabajó con 5 tratamientos T1 (sin biochar), T2 (2% de biochar), T3 (4% de biochar), T4 (2% de estiércol de vacuno) y T5 (1% de biochar + 1% de estiércol de vacuno). Biochar aumentó significativamente el rendimiento de biomasa en 61 (T2) y 82 % (T3), en comparación con T1. El pH, la capacidad de intercambio de cationes y la concentración de P y bases intercambiables (K, Na y Ca) aumentaron

significativamente, mientras que la acidez intercambiable y la concentración de H^+ , Al y Fe intercambiables disminuyeron significativamente después de la adición de biocarbón. Concluyó que el biocarbón es una enmienda potencial para mitigar las limitaciones de los suelos ácidos, lo que conduce a un mayor rendimiento de biomasa de la hierba elefante en los suelos.

1.2.2. A NIVEL NACIONAL

Guerra (2015), en su tesis, "Producción y caracterización de Biochar a partir de la biomasa residual de sistemas agroforestales y de agricultura convencional en la Amazonía Peruana", Lima. Evaluó las principales características físicas y químicas del biochar producido mediante pirólisis lenta (550 - 600 °C), a partir de ocho tipos de materias primas residuales de cultivos agroforestales y de cultivos de manejo tradicional de la zona norte. Encontraron diferencias estadísticamente significativas para todas las propiedades evaluadas del biochar según la materia prima empleada. Los biochars de cáscara de sachá inchi y de la corteza interna de palmito fueron los más idóneos para su aplicación en el suelo como enmiendas.

Iglesias (2018), en su tesis "Aplicación de Biochar a partir de biomasa residual de Eucalipto para evaluar la productividad con maíz en el austro ecuatoriano" Lima. Empleo dosis de biochar en porciones alta, media y baja. Obtuvo mejoras en el pH incrementando 0,9 unidades en comparación del testigo absoluto.

Trujillo *et al.* (2019), en su investigación "Producción y Caracterización de Biochar a partir de Residuos Orgánicos Avícolas", Lima, Perú. Empleo dosis de 1, 3, 5 y 7% de biochar producto de la biomasa de gallinaza y pollinaza. Obteniendo resultados significativos el tratamiento del 3% puesto que el cultivo de prueba presentó mayor longitud de crecimiento de los tallos.

1.2.3. A NIVEL LOCAL

Baltazar (2016), en su investigación, “Obtención de Biocombustible Sólido de Segunda Generación a partir de Tallos de Quinoa (*Chenopodium Quinoa* Willd) y Hojas de Eucalipto (*Eucalyptus Globulus* Labill), con Máxima Potencia Calorífica” Puno. Evalúa los tallos de quinua con el fin de mitigar los gases de efecto invernadero, así mismo, caracterizó las propiedades químicas de los tallos de quinua como el contenido de Ceniza 4,83 %, Grasa 1,88 %, Lignina 30,36 %, Celulosa 63,26 %, Humedad 10,5 %, y la Potencia Calorífica de 62,61 kcal/s.

Canihua (1996), en su tesis, “Efectos del encalado, sobre algunas características químicas de un suelo ácido, en el cultivo de papa”, Puno. El experimento fue conducido en el anexo Tahuaco del Instituto Nacional de Investigación Agraria E.E. ILLPA – Puno, comprensión del distrito y provincia de Yunguyo. Aplicó diferentes dosis de óxido de calcio con el fin de determinar el efecto sobre las propiedades químicas de un suelo ácido en el rendimiento de la papa variedad San Juan INIA. El suelo del campo experimental fue de textura franco a franco arenosa, con 4.5 de pH, con problemas de toxicidad de aluminio, manganeso, hierro e hidrógeno en el complejo coloidal; así mismos indica que estos suelos tienen origen en rocas ígneas ácidas constituida por granito, pórfido granítico y reolito, todas ellas de origen volcánico cuyo centro es el cerro Khapia.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia de las diferentes dosis de biochar en la remediación de suelos agrícolas ácidos bajo invernadero - Puno 2019.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Determinar qué dosis de biochar será más eficiente para remediar la acidez del suelo agrícola bajo invernadero.
- b) Determinar el efecto de las diferentes dosis de biochar en el cultivo de prueba bajo invernadero.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. ACIDIFICACIÓN DEL SUELO

La acidificación del suelo es la disminución del pH del suelo debido a la acumulación de iones como hidrógeno (H^+) y aluminio intercambiable (Al^{3+}), y en grado menor los iones de hierro (Fe^{3+}) y manganeso (Mn^{4+}) en el suelo; y la pérdida de cationes básicos como calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+), sodio (Na^+) (FAO, 2016; Fassbender & Bornemisza, 1994).

2.1.1.1. Fuentes de la acidificación del suelo

La acidificación del suelo es un proceso natural que se da durante la pedogénesis, el cual consiste en una pérdida de cationes alcalino y alcalino térreos (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) y un incremento constante de cationes metálicos (Al^{3+} , Fe^{3+} , Mn^{4+}) que pueden sufrir hidrólisis ácida (Zapata, 2004), este proceso puede ser acelerado por la agricultura intensiva (Loayza, 2020).

La fertilización de abonos nitrogenados al suelo da por resultado la formación de ácido nítrico, lo que puede reducir el pH a valores menores que 4, causando una acidificación

fuerte, aunque su efecto dura algunas semanas, en ese tiempo puede disolver el Al, Fe y Mn de los minerales del suelo, y contribuir a generar pérdidas apreciables de Ca y Mg, estas pérdidas pueden ser particularmente graves para la práctica de laboreo (Fassbender & Bornemisza, 1994).

Dentro de los principales fertilizantes de reacción ácida tenemos los siguientes (Fassbender & Bornemisza, 1994):

- Sulfato de amonio
- Superfosfatos: el nitrato de amonio y los fosfatos monoamónico y diatómico

El consumo de bases por parte de las plantas también ayuda a desbalancear el equilibrio entre cationes básicos y ácidos, favoreciendo la acumulación de los ácidos (Jaramillo, 2002).

El laboreo de los suelos incrementa el proceso de lavado de bases ya que al dejar el suelo al descubierto se facilita el proceso de lixiviación. Además, la mineralización del nitrógeno de residuos orgánicos aumenta el nivel de cationes orgánicos y genera una caída de pH natural (Baer, 1996).

La lluvia ácida, provenientes de regiones industriales, pueden tener un apreciable efecto en la acidificación sobre los suelos que tienen bajo contenido de materia orgánica (Fassbender & Bornemisza, 1994). Los principales causantes son el dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno y el amonio, los cuales pueden reaccionar con el oxígeno atmosférico y disolverse en el agua de lluvia, al precipitar esta agua de manera constante, el pH del suelo baja de 4.2 formándose un suelo con un alto contenido del aluminio intercambiable (Zapata, 2004).

2.1.1.2. Efectos de la acidificación del suelo

La acidez del suelo causa problemas a las plantas que se derivan de disturbios microbiológicos, aspectos nutricionales y fitotoxicidad por Al^{3+} , y en varios casos fitotoxicidad por hierro y manganeso.

Las altas concentraciones de Aluminio e Hidrógeno activo dan lugar a la acidez del suelo, afectando significativamente la disponibilidad y la asimilación de nutrientes y ejerciendo una fuerte influencia sobre la estructura del suelo (Castellanos, 2014).

Por otro lado Castro (2010) menciona que el aluminio intercambiable (Al^{3+}), es el ion intercambiable predominante, además, conforme disminuye el pH, aumenta la solubilidad de este elemento, a tal punto que puede resultar tóxico para las plantas, del mismo modo, al aumentar el pH del suelo disminuye la cantidad del aluminio intercambiable soluble, por precipitación, cuyo fenómeno se verifica hasta cercanías a la neutralidad, punto en que prácticamente todo el aluminio se encuentra insoluble. Precipitando el aluminio intercambiable a pH alrededor de 5,5 a 6,0.

Según el pH, el aluminio puede estar de forma soluble, intercambiable y tóxica para las plantas (Al^{3+}), o de forma polimerizada como hidróxido de aluminio o aluminatos (Porta *et al.*, 2003).

Figura 1 Distribución porcentual de las formas de aluminio en una solución de acuerdo al pH.

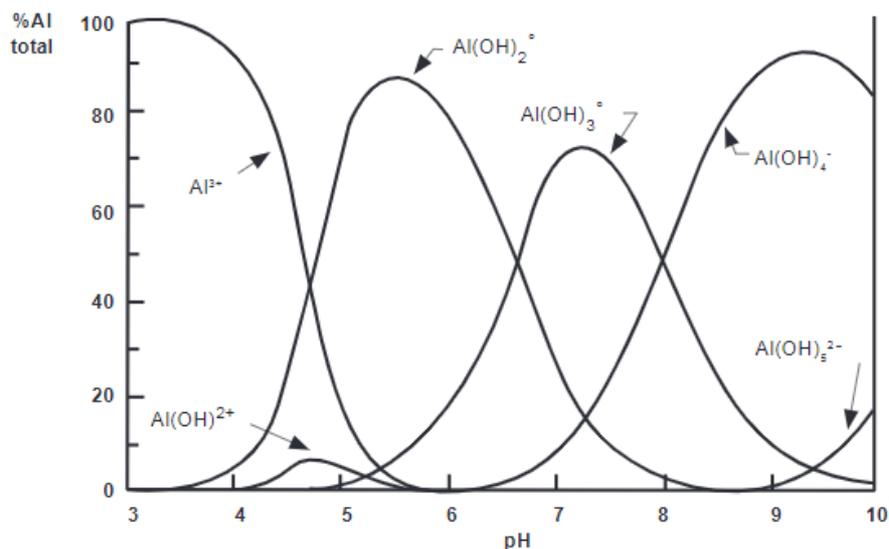


Figura 01. Comportamiento del aluminio en relación al pH del suelo

Fuente: (Porta *et al.*, 2003)

2.1.1.3. Toxicidad de aluminio

Los suelos ácidos presentan una baja capacidad de intercambio de cationes, bajo porcentaje de saturación de bases, alta concentración de aluminio intercambiable, baja disponibilidad de fósforo (P), Ca, Mg y algunos micronutrientes, que ocasionan toxicidad en las plantas debida al aluminio intercambiable y al manganeso (Castro, 2010).

La presencia de altas concentraciones de aluminio en la solución del suelo interfiere en el transporte y utilización de los nutrientes esenciales (calcio, magnesio, potasio y fósforo), reduciendo el crecimiento de raíces inhibiendo su elongación y penetración en el suelo y consecuentemente, reduciendo la absorción de agua y nutrientes, lo que conduce a un desarrollo deficiente del cultivo y bajos rendimientos (Campillo & Sadzawka, 2006).

Algunas plantas pueden superar esta toxicidad liberando aniones de ácidos orgánicos en el suelo que forman complejos con Al^{3+} y hacerlo no tóxico (Shetty *et al.*, 2021).

2.1.1.4. pH del suelo

Es una propiedad química importante del suelo, que expresa la actividad del ión hidrógeno (H^+) en la solución e identifica si el suelo es ácido, neutro o alcalino (Herrera, 2010; Campillo & Sadzawka, 2006).

Cuanto mayor sea la actividad de los H^+ libres, más ácido será el suelo; y en medida de que se incrementen los iones hidróxido (OH^-) la reacción será más básica o alcalina (Herrera, 2010). Este valor expresa la acidez activa del suelo, es decir, la cantidad de acidez (H^+ ó Al^{+3}) que se encuentra en la suspensión en equilibrio con el suelo (Fassbender & Bornemisza, 1994).

El pH se define como el logaritmo (en base 10) negativo de la actividad del ión hidrógeno presente en la solución del suelo (Campillo & Sadzawka, 2006).

La escala de pH va de 0 al 14, en suelos agrícolas sus valores normalmente varían entre 4 y 10, se considera suelos ácidos cuando los valores de pH son inferiores a 6,5, suelos neutros pH entre 6,6 y 7,3, y suelos básicos o alcalinos pH superiores a 7,4 (Sadeghian, 2016).

Esta propiedad es el indicador principal en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, influye en su solubilidad, movilidad y disponibilidad (FAO, 2021).

Tabla 01. Términos descriptivos del pH de los suelos y sus efectos esperables en cada intervalo.

Evaluación	pH	Efectos esperables
Extremadamente ácido	< 4,5	Condiciones muy desfavorables
Muy fuertemente ácido	4,5 – 5,0	Toxicidad de Al ⁺³ y
Fuertemente ácido	5,1 – 5,5	Exceso de Zn, Cu, Co, Fe y Mn Deficiencia de K, Mo, Mg, N, Ca, P y S Actividad bacteriana escasa
Moderadamente ácido	5,6 – 6,0	Adecuado para la mayoría de los cultivos
Ligeramente ácido	6,1 – 6,5	Máxima disponibilidad de nutrientes para la planta
Neutro	6,6 – 7,3	Mínimo efectos tóxicos Ausencia de carbonato de calcio a pH < 7,0
Ligeramente alcalinos	7,4 – 7,8	Suelos generalmente con carbonato de Calcio
Moderadamente alcalino	7,9 – 8,4	Disminuye la disponibilidad de P, Deficiencia creciente de Zn, Cu, Co, Mn, Fe Clorosis férrica
Fuertemente alcalino	8,5 – 9,0	Probablemente se presencia carbonato de Magnesio en suelos no sódicos > problema de clorosis férrica Toxicidad de B
Muy fuertemente alcalino	>9,0	Existencia de carbonato de sodio Suelo sódico toxicidad de B y Na Deficiencias de micronutrientes excepto Mo Poca actividad microbiana Condiciones muy desfavorables

Fuente (Porta *et al.*, 2003)

Para evaluar esta medida, hay que tener en cuenta el cultivo que se piensa plantar en el suelo que se estudia, cada planta tiene un valor de pH óptimo y un rango de tolerancia para su desarrollo (Jaramillo, 2002).

2.1.2. BIOCHAR

El biochar es un material rico en carbono (C) que se obtiene de la descomposición térmica de residuos orgánicos a temperaturas que generalmente oscilan entre 250 a 1200°C y bajo un suministro limitado de oxígeno. Este material se diferencia del carbón vegetal u otro producto de carbono en que está destinado a ser aplicado en el suelo o aún más amplio en la gestión ambiental (Lehmann & Joseph, 2015).

Con respecto a sus propiedades físicas, el biochar es un sólido carbonoso, de color negro, con una superficie intrincada y desordenada, cuyas características estructurales se ven principalmente por la temperatura, el tiempo de pirólisis, velocidad de calentamiento y el tipo de materia prima, que le otorgan características como gran área superficial y alta porosidad con micro (2nm), meso (2 - 50nm) y macroporos (>50nm); por lo que, no todos los biochars poseen las mismas características físicas y químicas (Nieto, 2019).

Los biochars pirolizados a temperaturas bajas poseen mayor cantidad nutricional, (Kannan et al., 2021); sin embargo, los biochars producidos a altas temperaturas tienden a ser altamente alcalinos (Shetty et al., 2021).

La biomasa está formada principalmente por tres componentes orgánicos como la celulosa, hemicelulosa y lignina.

2.1.2.1. Beneficios del biochar

Los antecedentes de uso de biochar (biocarbón) en el suelo se remontan a la época precolombina en Brasil conocidas como "Terras Pretas", estos suelos se caracterizan por un alto contenido de carbono, en comparación con los suelos circundantes (Lehmann & Joseph, 2015).

El biochar es considerado como un acondicionador del suelo que mejora sus propiedades físicas, químicas y biológicas, mejora su fertilidad liberando importantes cantidades de nutrientes esenciales (Martínez, 2015).

La aplicación del biochar en el suelo mejora la estructura, la distribución del tamaño de poros, el área superficial total, la densidad aparente, capacidad de retención de humedad, crecimiento de plantas y facilidad de laboreo del suelo (Balta, 2019).

El biochar generalmente aumenta la capacidad de intercambio catiónico, por lo tanto, la retención de macronutrientes (NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , P , Mg^{2+}) y micronutrientes (Cu , Zn , Fe y Mn), esenciales para el desarrollo de la planta (Palomino, 2019; Shetty *et al.*, 2021). Así mismo, por su naturaleza alcalina, el biochar aumenta el pH del suelo y reduce la acidez intercambiable debido a su alto contenido de calcio y magnesio (Kannan *et al.*, 2021; Shetty *et al.*, 2021). Así mismo, el contenido de carboxilo e hidroxilo en el biochar permite precipitar el aluminio intercambiable en forma de hidróxido de aluminio, siendo en esta forma insoluble para las plantas en su condición normal (Kannan *et al.*, 2021).

Además, no es necesario aplicarlo repetidamente en un cultivo como en el caso de abono, compostas, cal, roca travertino o fertilizantes ya que persiste contra la degradación biológica y química durante períodos de tiempo mucho más largos (1000 a 2000 años) que materia orgánica no carbonizada; por otro lado, el biochar disminuye el impacto ambiental en los recursos hídricos del suelo, además, al emplearse como enmienda en el suelo este actúa como un sumidero de carbono a largo plazo (Lehmann & Joseph, 2015).

2.1.2.2. Producción del biochar

El biochar es producto del aprovechamiento sostenible de la biomasa, el cual comprende todo tipo de residuos, desde residuos agrícolas, forestales, de granja, hasta residuos domésticos e industriales (Lehmann & Joseph, 2015).

El aprovechamiento de los residuos de cosecha, como materia prima en la producción de biochar para regiones agrícolas puede resultar muy beneficioso desde el punto de vista del manejo sostenible de los suelos.

La producción de biochar se obtiene a través de la pirólisis (Lehmann & Joseph, 2015). La pirólisis es un proceso de descomposición termoquímica en donde la materia orgánica es convertida en un sólido rico en carbono y en materia volátil, mediante calentamiento en condiciones de bajo contenido o en ausencia de oxígeno (Guerra, 2015).

Existen tres tipos de pirólisis, pirólisis lenta se caracteriza por lapsos de calentamiento de la biomasa a temperaturas bajas y largos tiempos de residencia de los sólidos y gases; pirólisis rápida se caracteriza por un calentamiento muy rápido de la materia prima lo cual conlleva a una mayor producción de bioaceites en comparación con la producción de biocarbones; y gasificación se caracteriza por la oxidación parcial de la biomasa con aire, oxígeno o vapor de agua a altas temperaturas (Olmo, 2016).

2.1.3. CULTIVO DE PRUEBA

La avena (*Avena sativa* L.), entre los cereales, es la especie más utilizada como cultivo de forraje y grano, tiene importancia económica en toda la zona alto andina (INIA, 2007).

La avena, es una planta herbácea anual de la familia gramíneas. Posee raíces fibrosas más abundantes y profundas que otros cultivos forrajeros; sus tallos son gruesos y rectos que varían de 0,5 a 2 m de altura y están formados por entrenudos que terminan en

gruesos nudos; sus hojas son planas y alargadas con láminas torcidas hacia la izquierda con borde libre dentado, el limbo de la hoja es estrecho y extenso con lígula larga, carece de aurícula, su flor es un racimo de espiguillas, situadas sobre los pedúnculos largos y su fruto es en cariósipide, con glumillas adheridas (Mamani, 2016).

Las fases fenológicas de desarrollo del cultivo de avena forrajera son la emergencia, tercera hoja, macollaje, encañado, panoja, floración maduración lechosa, maduración pastosa y maduración córnea (SENAMHI, 2017).

De acuerdo a los citados de (Puma, 2022), esta especie vegetal de clima templado y frío requiere una temperatura de 6°C para germinar y de 12 a 16°C para completar su floración. En condiciones de secano, requiere una precipitación pluvial anual de 400 a 600 mm. Su rango de adaptación va desde los 2,900 a 3,900 msnm (INIA, 2007).

La avena, se adapta a terrenos preferentemente profundos de textura franco a franco arcilloso de pH 5,5 – 7,8 (Argote & Ruiz, 2011).

La época oportuna de siembra de avena para forraje es noviembre a diciembre. La densidad de siembra para producción de forraje, en siembra manual es de 120 kg/ha. La cosecha de forraje de avena se efectúa al estado grano lechoso (105 a 120 días posterior a la siembra) (INIA, 2007).

2.2. MARCO CONCEPTUAL

Pedogénesis: Conjunto de procesos físicos y biológicos que presiden la génesis y evolución de los suelos, y que conciernen tanto a la alteración de la roca madre como a las transformaciones en el interior del perfil (Fraume, 2007).

Suelo: Es un cuerpo natural, dinámico, complejo y en evolución hecho por los procesos y factores de formación, ubicado sobre la superficie de la corteza terrestre y conformada de

materiales orgánicos y minerales, agua y gases, de donde las plantas extraen sus alimentos para desarrollarse y dar productos en provecho del hombre (Herrera, 2010).

Suelo agrícola: Es el suelo dedicado a la producción de cultivos, forrajes y pastos cultivados, así como, el desarrollo de la ganadería. Incluye tierras clasificadas como agrícolas, que mantienen un hábitat para especies permanentes y transitorias, además de flora y fauna nativa, como las áreas naturales protegidas (MINAM, 2017).

Acidificación del suelo: Es la disminución del pH del suelo debido a la acumulación de iones de hidrógeno y aluminio en el suelo, y la pérdida asociada de cationes básicos tales como el calcio, magnesio, potasio y sodio del suelo debido a la lixiviación o remoción del producto (Pennock & Mckenzie, 2016).

Conductividad eléctrica: Magnitud que indica la capacidad de circulación de la corriente eléctrica al aprovechar la propiedad de las sales en la conducción del suelo, por ende , mide la concentración de sales solubles en la solución del suelo. Este parámetro es uno de los determinantes de la calidad y fertilidad del suelo agrícola (INTAGRI, 2017). Fassbender & Bornemisza (1994) indica que los suelos con concentración de conductividad eléctrica mayores de 2 mmhos/cm afecta a la mayoría de los cultivos debido a que presentan problemas de salinidad.

Materia orgánica: Fracción orgánica del suelo que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, tejidos y células de organismos que viven en el suelo y sustancias producidas por los habitantes del suelo (Fassbender & Bornemisza, 1994).

Calcio: Macronutriente esencial para el desarrollo de la planta, necesario en los puntos de crecimiento de nuevos tejidos, en donde desempeña una parte esencial en el

desarrollo de las raíces y del apéndice, las raíces deficientes en Ca a menudo se ponen negras y se pudren (Herrera, 2010).

Magnesio: Componente vital de la clorofila de la planta, por tanto, esencial para la fotosíntesis y para la formación de otros pigmentos. Activa numerosas enzimas del metabolismo de las proteínas y glúcidos (Herrera, 2010).

2.3. HIPÓTESIS

2.3.1. HIPÓTESIS GENERAL

La aplicación de diferentes dosis de biochar tienen diferentes niveles de eficiencia en la remediación de la acidez de suelos agrícolas bajo invernadero.

2.3.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICOS

- a) Existe una dosis de biochar más eficiente para remediar la acidez del suelo agrícola bajo invernadero.
- b) Existen dosis de biochar con mejores efectos en el cultivo de prueba bajo invernadero.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. ZONA DE ESTUDIO

La investigación se realizó en el invernadero de la Estación Experimental Agraria Illpa - Puno, del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) anexo Salcedo (anexo figura 10), en el área de laboratorio de análisis de aguas y suelos, del distrito, provincia y departamento de Puno. Ubicado en las siguientes coordenadas geográficas 15°52'52" latitud sur, 70°00'08" latitud oeste y 3,850 m.s.n.m de altitud. La temperaturas promedios del invernadero oscilaron entre una máxima de 35 °C, una media de 22 °C y una mínima de 9°C.

3.2. TAMAÑO DE MUESTRAS

3.2.1. Población

La población considerada para la presente investigación es el suelo agrícola de la Estación Experimental Agraria Illpa Puno anexo Tahuaco, con una extensión de una hectárea lote N° 5, ubicada en las siguientes coordenadas geográficas 16°19'06.3" latitud sur, 69°03'25.5" latitud oeste y 3829 m.s.n.m. de altitud.

3.2.2. Muestra

La muestra consta de 85 kg de suelo agrícola con problemas de acidez, del lote 5 que fue tomada siguiendo la técnica de muestreo compuesto , a una profundidad de 30cm, los cuales se trasladaron a la Estación Experimental Illpa sede Salcedo, ubicada en la Av. Industrial del distrito de Puno, mismos que fueron secados a ambiente libre, se homogeneizaron y tamizaron (2 mm de diámetro), de lo cual se extrajo 1 kg de muestra de suelo para el análisis inicial (anexo Figura 07).

Tabla 02. Análisis físico químico del suelo agrícola en estudio.

Propiedades	Cantidad	Método	Interpretación
Arena	54,88%	Hidrómetro	-
Arcilla	9,12%	Hidrómetro	-
Limo	36,00%	Hidrómetro	-
Clase Textural	FA	Triángulo Textural	Franco Arenoso
Materia Orgánica	1,50%	Calcinación	Bajo
pH	5,18	Potenciómetro	Fuertemente Ácido
C.E.	0,066	Conductímetro	No salino
	mmhos/cm		
Cationes cambiables			
Aluminio	2.42 me/100g	Extracción de KCl 1N	Alto
Calcio	1.40 me/100g	EDTA	Bajo
Magnesio	0.60 me/100g	EDTA	Mediano

Fuente: Laboratorio de análisis de aguas y suelos EEA Illpa Puno.

3.3. MÉTODO Y TÉCNICAS

Se emplearon siete tratamientos, considerando al T0 (control), los cuales fueron distribuidos al azar. Las diferentes dosis de biochar empleados en el presente experimento se muestran en la Tabla 03. El porcentaje (%) de biochar se aplicó de acuerdo a estudios realizados por Martínez (2015) y Trujillo (2019).

Tabla 03. Identificación de tratamientos y el empleo de la cantidad dosis de biochar por tratamiento.

Enmienda	Tratamiento	Dosis de biochar en %	Dosis de biochar en g/4kg de suelo
Biochar	T0	0.0	0.0
	T1	0.5	20.0
	T2	1.0	40.0
	T3	2.0	80.0
	T4	4.0	160.0
	T5	8.0	320.0
	T6	16.0	640.0

3.3.1. Características de la distribución experimental

El experimento se instaló en bolsas negras de almácigo, de acuerdo a la distribución del experimento (figura 03)(anexo Figura 16).

Tabla 04. Descripción de las características del experimento.

Descripción	Características
Número de tratamientos	7
Número de repeticiones	3
Número de unidades experimentales (N° de bolsas)	21
Altura de la bolsa de almácigo	28 cm
Ancho de la bolsa de almácigo	16 cm
Peso promedio de suelo/bolsa de almácigo	4 kg



Figura 02. Distribución experimental

3.3.2. Conducción de experimento

El biochar de tallos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) se obtuvo en el laboratorio de análisis de aguas y suelos de EEA Illpa, anexo Salcedo, el proceso de pirólisis se realizó en una mufla por 30 minutos, a una temperatura de 550 - 600°C (anexo Figura 12).

El material obtenido de la pirólisis fue triturada manualmente (anexo Figura 13), luego se procedió a pesar las diferentes dosis de biochar y el suelo ácido (4 kg/bolsa), seguidamente se procedió a homogenizar y se verter en las bolsas de almácigo cada unidad experimental con sus respectivos repeticiones.

Posteriormente se realizó la siembra del cultivo de prueba “avena (*Avena sativa* L.)” en cada tratamiento y repetición, con la finalidad de mantener la humedad del suelo a capacidad de campo; la siembra se realizó el 3 de diciembre de 2019 y la cosecha el 8 de marzo de 2020 (anexo Figura 14).

Finalmente se muestreo todas las unidades experimentales de los suelos del presente experimento (31 de mayo de 2021). El análisis fisicoquímico de las muestras de los suelos fueron analizadas en el laboratorio de análisis de aguas y suelos de la EEA Illpa Puno, anexo Salcedo (anexo Figura 08 y 09).

3.4. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Variable independiente:

- Diferentes dosis de biochar

Variable dependiente:

- Suelos agrícolas ácidos
 - Reacción del suelo (pH)
 - Porcentaje de aluminio intercambiable (%)
 - Conductividad eléctrica del suelo (mmhos/cm)
 - Porcentaje de calcio intercambiable (%)
 - Porcentaje de magnesio intercambiable (%)

- Materia orgánica del suelo (%)
- Materia verde de la avena (tn/ha)

3.5. MÉTODO O DISEÑO ESTADÍSTICO

Se adoptó el Diseño Experimental Completamente al Azar (DCA) con siete tratamientos y tres repeticiones, con un total de 21 unidades experimentales. El modelo lineal general está representado por:

$$y_{ij} = u + T_i + e_{ij}$$

Donde:

- y_{ij} = es la variable de respuesta.
- u = es la media general.
- T_i = es el efecto al i ésimo tratamiento.
- e_{ij} = es el error experimental.

Se realizaron las pruebas de comparación múltiple de medias de Dunnett al 95% de confianza. Los datos de las variables de respuesta se procesaron con el software SAS 9.4 (System Analyzer Statistic).

3.5.1. Prueba de normalidad y homogeneidad de varianzas

Los datos de las eficiencias del porcentaje de calcio intercambiable y magnesio intercambiable fueron transformados a datos angulares (arco-seno \sqrt{x}) por estar expresados en porcentajes, para cumplir los principios de normalidad (Bartlett) y homogeneidad de la varianza (Kolmogorov-Smirnov); en cambio, los datos de las eficiencias de la materia orgánica, reacción del suelo (pH), porcentaje de aluminio intercambiable y materia verde de la avena se procesaron en un análisis de varianza no paramétrica (Kruskal-Wallis), puesto que no cumplieron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas a pesar de las transformaciones tal como lo recomienda Montgomery (2017).

CAPÍTULO IV

EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. OBJETIVO 1. EFICIENCIAS DE LAS DIFERENTES DOSIS DE BIOCHAR EN LA REMEDIACIÓN DE LA ACIDEZ DEL SUELO AGRÍCOLA

Tabla 05. Resultados de análisis de varianza para las variables en estudio “reacción del suelo (pH), porcentaje de aluminio intercambiable (Al), materia orgánica (MO), conductividad eléctrica del suelo (CE), porcentaje de calcio intercambiable (Ca) y magnesio intercambiable (Mg)”

Factor	pH	Al (%)	MO (%)	CE (mmhos/cm)	Ca (%)	Mg (%)
Tratamiento	*	**	ns	**	ns	ns
CV (%)	-	-	-	27.40	10.01	20.60
Media general de las eficiencias	1.79	-36.55	0.49	1.80	-2.86	43.95

** : Altamente significativo, * : significativo, ns : no significativo

En la Tabla 05 se presentan los resultados de análisis de varianza (ANVA) para las variables en estudio de los suelos ácidos agrícolas de la Estación Experimental Illpa INIA

anexo Tahuaco, donde para los factores de tratamiento como las eficiencias de la materia orgánica (MO), saturación de calcio intercambiable (Ca^{++}) y magnesio intercambiable (Mg^{++}); no existieron diferencias estadísticas significativas ($p \geq 0.05$), lo que demuestra que todos los tratamientos tuvieron efectos o influencias similares comparados con el T0 (control), lo cual se presume que se deba al factor suelo y biochar (Lehmann & Joseph, 2015); en cambio, para las eficiencias de la saturación de aluminio intercambiable (Al^{+++}) y conductividad eléctrica del suelo (CE) existieron diferencias estadísticas altamente significativas ($p \leq 0.01$); asimismo para las eficiencias de la reacción del suelo (pH) existieron estadísticas significativas ($p \leq 0.05$); lo que nos indican que al menos uno de los tratamientos con biochar influye y es diferente comparado con T0 (control).

Los coeficientes de variación (CV) transformados para las eficiencias de la conductividad eléctrica del suelo (CE), saturación de calcio intercambiable (Ca^{++}) y magnesio intercambiable (Mg^{++}) fueron de 27.40, 10.01 y 20.60% respectivamente, los cuales cumplieron las pruebas o principios de normalidad (Bartlett) y homogeneidad de la varianza (Kolmogorov-Smirnov), indicando que estos variables evaluados son estadísticamente confiables. Por otra parte, para las eficiencias de la reacción del suelo (pH), saturación de aluminio intercambiable (Al^{+++}) y materia orgánica del suelo (MO) no se muestran las coeficientes de variación, puesto que los datos se efectuaron en un análisis de varianza no paramétrica (Kruskal-Wallis), debido a que no cumplen los supuesto de normalidad y homogeneidad de varianzas (Tabla 5).

4.1.1. Eficiencias de la reacción de suelo (pH)

Tabla 06. Comparación múltiple de Dunnett ($p \leq 0.05$) para la eficiencia de la reacción del suelo (pH)

Tratamientos	Dosis de biochar %	pH Inicial	pH Final	Eficiencia \pm Error estándar
T0 (control)	0.0	5.18	5.25	0.07 \pm 0.09
T1	0.5	5.18	5.58	0.40 \pm 0.02 ns
T2	1.0	5.18	5.90	0.72 \pm 0.02 ns
T3	2.0	5.18	6.58	1.40 \pm 0.04 ns
T4	4.0	5.18	7.24	2.06 \pm 0.23 ns
T5	8.0	5.18	8.60	3.42 \pm 0.10 ***
T6	16.0	5.18	9.64	4.46 \pm 0.46 ***

Diferencias (***) o similitud (ns= no significativo) respecto al T0= tratamiento control

En la Tabla 06 se muestra la prueba de comparación múltiple de Dunnett ($p \leq 0.05$) para la eficiencia de la reacción del suelo (pH); donde se observa que los tratamientos T5 (biochar 8%) y T6 (biochar 16%) tuvieron influencias diferentes comparados con el T0 (control); por otra parte, los tratamientos T1 (biochar 0.5%), T2 (biochar 1%), T3 (biochar 2%) y T4 (biochar 4%) tuvieron efectos similares comparados con el T0 (control), resultando así como los mejores tratamientos debido a que las eficiencias de aumento fueron ligeras, además, los valores de pH del suelo en los tratamientos están en rangos aceptables para el crecimiento y desarrollo de los cultivos; mientras que, los tratamientos T5 y T6 tuvieron altas eficiencias de aumento, los cuales logran que los valores del pH del suelo sean alcalinos ($pH > 8$).

Los presentes resultados de pH del suelo guardan relación con lo que sostiene Gilces (2014), quien de su trabajo de investigación concluye que el biochar presenta mejores resultados en suelos ácidos, debido al efecto alcalinizante, reportando así un incremento de pH de 4.8 a 5.1 y 5.4. Además, Martínez (2015) reporta similar comportamiento en su trabajo de investigación, donde con diferentes dosis de biochar de 5%, 10% y 20% el pH incrementó de 5.9 a 7.0, 7.9 y 8.0 respectivamente.

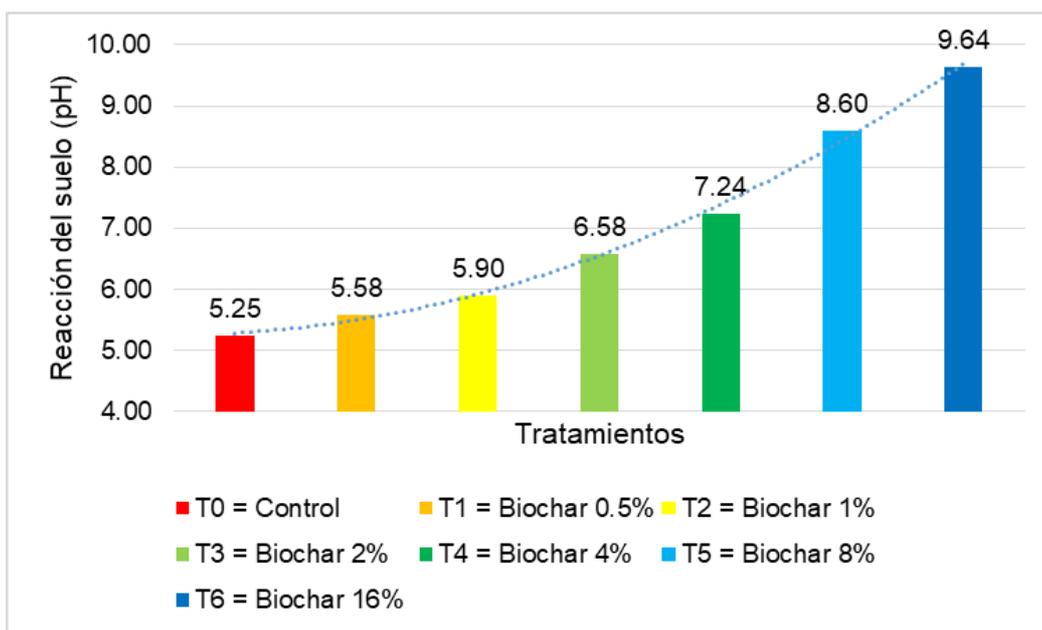


Figura 03. Representación gráfica de medias para el pH del suelo

En la Figura 03 se aprecia la eficiencia de la reacción del suelo (pH), donde muestra que, las diferentes proporciones de biochar en el suelo tienen una tendencia gradual en el aumento de las eficiencias, es decir, al aumentar gradualmente las dosis de biochar también aumenta el pH del suelo paulatinamente, lo cual se debe al efecto encalante del biochar puesto que presenta pH alcalino. Similares resultados fueron reportados por Gilces (2014); Fiallos *et al.* (2015); Martínez (2015) y Kannan *et al.* (2021).

4.1.2. Eficiencias del porcentaje de aluminio intercambiable (AI)

Tabla 07. Comparación múltiple de Dunnett ($p \leq 0.05$) para la eficiencia del porcentaje de aluminio intercambiable (AI)

Tratamientos	Dosis de biochar %	AI Inicial (%)	AI Final (%)	Eficiencia (%) \pm Error estándar
T0 (Control)	0.0	43.84	33.59	-10.25 \pm 3.29
T1	0.5	43.84	14.56	-29.28 \pm 1.00 ns
T2	1.0	43.84	2.85	-40.99 \pm 0.37 ns
T3	2.0	43.84	0.00	-43.84 \pm 0.00 ***
T4	4.0	43.84	0.00	-43.84 \pm 0.00 ***
T5	8.0	43.84	0.00	-43.84 \pm 0.00 ***
T6	16.0	43.84	0.00	-43.84 \pm 0.00 ***

*Diferencias (***) o similitud (ns) respecto al T0

En la Tabla 07 se muestra la prueba de comparación múltiple de Dunnett ($p \leq 0.05$) para la eficiencia de porcentaje de aluminio intercambiable del suelo; donde se observa que los tratamientos T1 (biochar 0.5%) y T2 (biochar 1%) tuvieron influencias similares estadísticamente comparados con el T0 (control); por otra parte, los tratamientos T3 (biochar 2%), T4 (biochar 4%), T5 (biochar 8%) y T6 (biochar 16%) tuvieron influencias diferentes estadísticamente comparados con el T0 (control); mostrándose como los mejores tratamientos, puesto que reduce las excesivas concentraciones de aluminio en el complejo de intercambio catiónico, conforme aumenta el pH del suelo disminuye la cantidad de aluminio intercambiable soluble, por precipitación, cuyo fenómeno se verifica hasta cercanías a la neutralidad punto en que prácticamente todo el aluminio se encuentra insoluble, precipitándose el aluminio intercambiable a pH alrededor de 5.5 a 6.0 tal como mencionan Castro (2010), Zapata (2004).

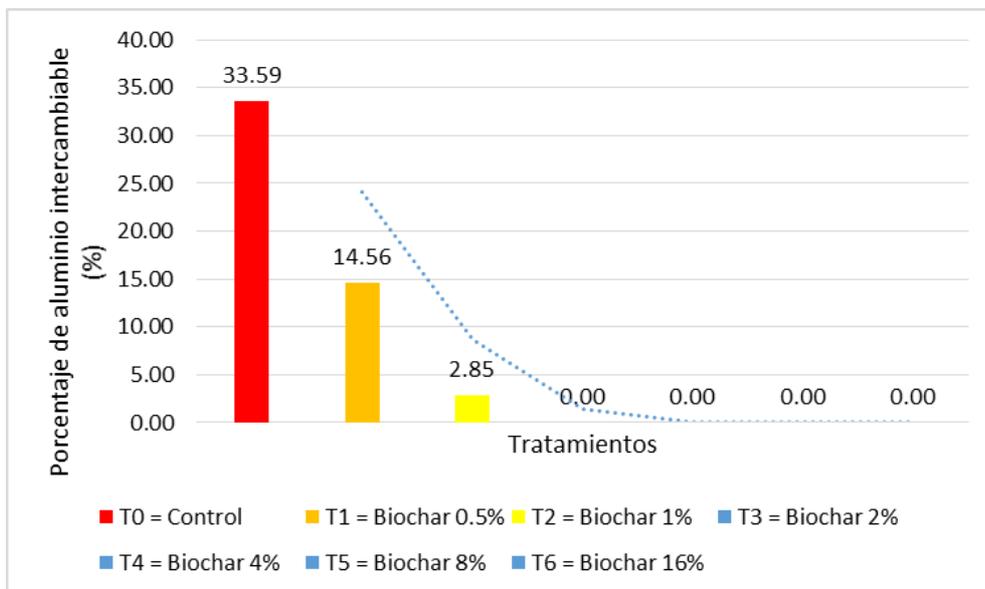


Figura 04. Representación gráfica de medias para porcentaje de aluminio intercambiable

En la Figura 04 se aprecia el porcentaje de aluminio intercambiable, donde muestra que a medida que aumenta las diferentes proporciones de biochar, reducen considerablemente el porcentaje de aluminio intercambiable en el complejo coloidal del suelo; ello se debe tanto a la alcalinidad del biochar, presencia de cationes básicos como calcio y magnesio, y su capacidad de adsorción (Shetty *et al.*, 2021). Así mismo, Kannan *et al.* (2021) indica que el aluminio se precipita como hidróxido de aluminio, debido a la presencia de hidroxilo y carboxilo en el biochar. Además, Nguyen *et al.* (2021) concluye que el Al disminuyó significativamente después de la adición del biochar.

4.1.3. Eficiencias de la conductividad eléctrica del suelo (CE)

Tabla 08. Comparación múltiple de Dunnett ($p \leq 0.05$) para la eficiencia de la conductividad eléctrica del suelo

Tratamientos	Dosis de biochar %	CE (mmhos/cm) Inicial	CE (mmhos/cm) Final	Eficiencia (mmhos/cm) \pm Error estándar
T0 (Control)	0.0	0.066	0.63	0.56 \pm 0.09
T1	0.5	0.066	1.02	0.96 \pm 0.10 ns
T2	1.0	0.066	1.31	1.24 \pm 0.12 ns
T3	2.0	0.066	1.44	1.38 \pm 0.23 ns
T4	4.0	0.066	1.83	1.76 \pm 0.15 ***
T5	8.0	0.066	2.95	2.88 \pm 0.56 ***
T6	16.0	0.066	3.88	3.81 \pm 0.38 ***

Diferencias (***) o similitud (ns) respecto al T0

En la Tabla 08 se muestra la prueba de comparación múltiple de Dunnett ($p \leq 0.05$) para la eficiencia de la conductividad eléctrica del suelo (CE); donde se observa que los tratamientos T4 (biochar 4%), T5 (biochar 8%) y T6 (biochar 16%) tuvieron influencias diferentes estadísticamente comparados con T0 (control); en cambio los tratamientos T1 (biochar 0.5%), T2 (biochar 1%) y T3 (biochar 2%) tuvieron efectos similares estadísticamente comparados con T0 (control), por lo cual demuestran ser los mejores tratamientos, debido a que las eficiencias de aumento de la conductividad eléctrica de los suelos fueron ligeros ($CE < 2$ mmhos/cm), los cuales son adecuados para el crecimiento y desarrollo de cultivos, puesto que la $CE > 2$ mmhos/cm influyen negativamente en la productividad de la mayoría de los cultivos (Porta et al., 2003).

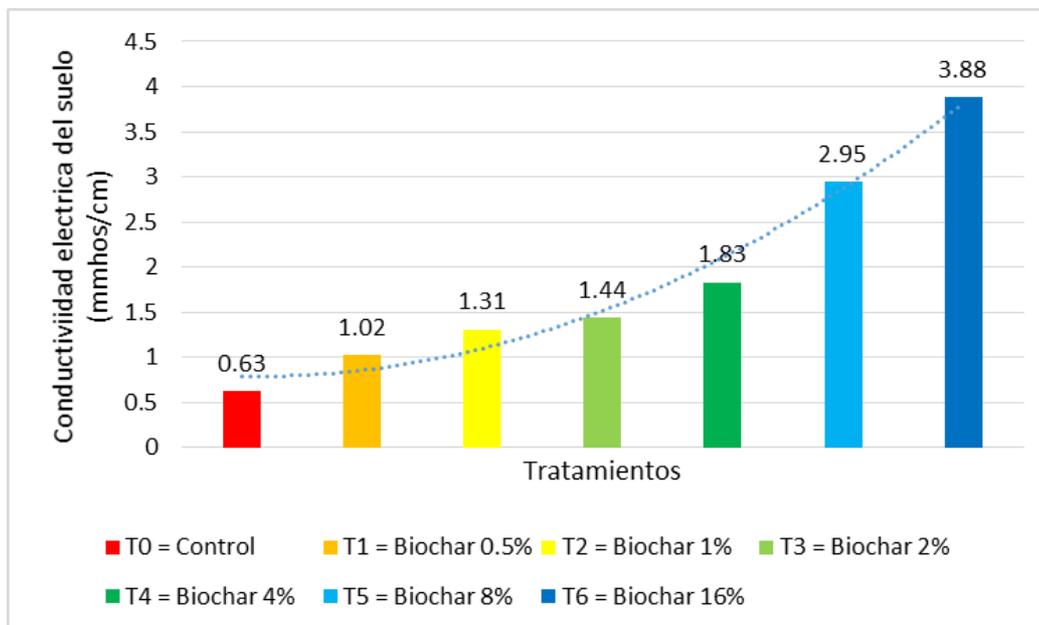


Figura 05. Representación gráfica de medias para la conductividad eléctrica del suelo

En la Figura 05 se aprecia la conductividad eléctrica del suelo, el cual nos muestra que la conductividad eléctrica incrementa de forma gradual de acuerdo a las proporciones crecientes de biochar, resultados similares obtuvieron Dominchin *et al.* (2019) y Liang *et al.* (2014) al aplicar dosis crecientes de biochar en el suelo.

La aplicación de elevados porcentajes de biochar de tallos de quinua (CE = 4.09 mmhos/cm) a partir de 4% influye gradualmente en la salinización del suelo, debido a que el biochar presenta alto contenido de conductividad eléctrica.

4.2. OBJETIVO 2. EFECTO DE LAS DIFERENTES DOSIS DE BIOCHAR EN EL CULTIVO DE PRUEBA AVENA (*Avena sativa* L.)

4.2.1. Productividad de la materia verde de la avena

Los resultados de análisis de varianza (ANVA) para la productividad de la materia verde de la avena muestra que si existió diferencias estadísticas significativas ($p \geq 0.05$), lo que significa que al menos uno de los tratamientos con biochar influye en el crecimiento del cultivo y es diferente comparado con el T0 (control), (anexo Tabla 10).

Tabla 09. Comparación múltiple de Dunnett ($p \leq 0.05$) para la materia verde de la avena

Tratamientos	Dosis de biochar %	Productividad (ton/ha) \pm Error estándar
T0 (Control)	0.0	13.18 \pm 0.01
T1	0.5	14.48 \pm 0.03 ns
T2	1.0	16.85 \pm 0.06 ns
T3	2.0	17.84 \pm 0.05 ***
T4	4.0	17.89 \pm 0.29 ***
T5	8.0	11.86 \pm 0.23 ns
T6	16.0	1.21 \pm 0.12 ns

Diferencias (***) o similitud (ns) respecto al T0

En la Tabla 09 se muestra la prueba de comparación múltiple de Dunnett ($p \leq 0.05$) para la productividad de la materia verde de la avena (*Avena sativa* L.); donde se observa que los tratamientos T1 (biochar 0.5%), T2 (biochar 1%), T5 (biochar 8%) y T6 (biochar 16%) tuvieron efectos similares estadísticamente comparados con el T0 (control); en cambio, los tratamientos T3 (biochar 2%) y T4 (biochar 4%) tuvieron efectos diferentes

estadísticamente comparados con el T0 (control), lo que evidencia la influencia del biochar sobre alta productividad de materia verde de la avena. Estos resultados guardan estrecha relación con lo que sostiene Olmo (2016) quien señala que la adición de biochar tiene un impacto positivo en el aumento de la producción de la biomasa aérea y longitud de raíces. Asimismo, existió una correlación directa con la reacción del suelo (pH) (Figura 07).

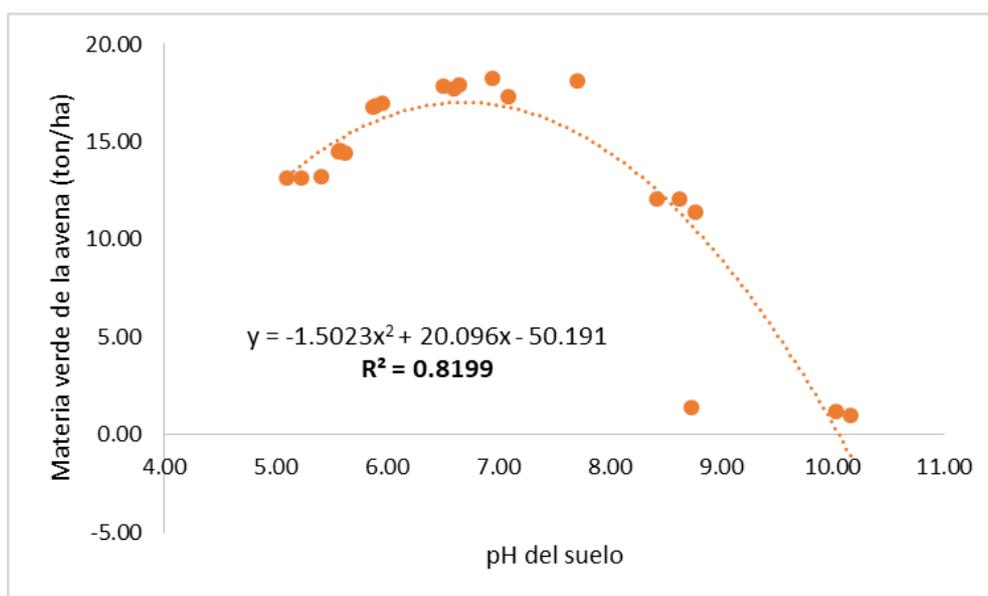


Figura 06. Correlación de Pearson entre el pH del suelo y la productividad de la materia verde de la avena

En la figura 06 se muestra la correlación entre la reacción del suelo (pH) y la productividad de la materia verde de la avena ($r = -0.69$ "correlación negativa"), donde se observa que a pH 7 la productividad de la materia verde es alta, y a pH menor o mayor a 7 se obtiene menor productividad; lo cual se debe a la disponibilidad de nutrientes en el suelo, puesto que, Porta *et al.* (2003) señalan que la condición adecuada de pH para la asimilación de nutrientes y para el desarrollo de las plantas se encuentra a pH mayores de 6.5 y menores de 7.5; además la línea de tendencia a la que se ajusta la distribución de los datos con R^2 resulta a una regresión polinómica.

CONCLUSIONES

De los resultados del presente trabajo de investigación, se establecen las siguientes conclusiones:

PRIMERA. La aplicación de las diferentes dosis de biochar de tallos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) fue eficiente para remediar la acidez del suelo agrícola, estadísticamente el biochar fue eficiente en la reacción del suelo (pH), el aluminio intercambiable (Al^{+++}), la conductividad eléctrica del suelo (CE) y materia verde de la avena (MV), sin embargo, no influyó en la saturación de calcio (Ca^{++}), magnesio (Mg^{++}) intercambiable y la materia orgánica (MO) del suelo. Por consiguiente, se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula.

SEGUNDA. La mejor eficiencia se dio con el tratamiento T3 (biochar 2%), tomando en consideración la reacción del suelo (pH) donde aumentó en 1.40, la saturación de aluminio intercambiable (Al^{+++}) en el complejo coloidal fue sustituido por otros cationes y precipitado en su totalidad (0,00%), y la conductividad eléctrica (CE) del suelo aumentó en 1,38 mmhos/cm. Por ende, se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula.

TERCERA. El biochar tuvo efecto neutralizante en la acidez del suelo, por lo tanto los tratamientos T3 (biochar 2 %) y T4 (biochar 4 %) presentaron mayor productividad de la materia verde de la avena (*Avena sativa* L.) de 17.84 y 17.89 ton/ha respectivamente. Por consiguiente, se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula.

RECOMENDACIONES

De las conclusiones obtenidas, se establecen las siguientes recomendaciones:

PRIMERA. A los investigadores realizar investigaciones en condiciones de campo en los suelos agrícolas con problemas de acidez, calculando y aplicando dosis de biochar de tallos de quinua comparando con otras fuentes de remediación de la acidez en suelos.

SEGUNDA. Conociendo que el pH óptimo de los suelos para el crecimiento y desarrollo de los cultivos se da en un rango de 6.5 a 7.5, por lo cual, se recomienda incorporar las dosis de los tratamientos T3= 2 % y T4= 4 % de biochar, debido al mejor efecto en la productividad de materia verde de la avena forrajera.

TERCERA. A los productores agrícolas que cuentan con suelos con problemas de acidez considerar la aplicación de biochar preparado a base de tallos de quinua para elevar el pH de sus suelos a niveles de neutralidad mejorando la fertilidad y productividad de los mismos.

BIBLIOGRAFÍAS

- Alonso, L. A., Cruz, A., Jiménez, D., Ocampo, Á., & Parra, S. (2016). Biochar como enmienda en un oxisol y su efecto en el crecimiento del maíz. *Revista U.D.C.A Actualidad & camp; Divulgación Científica*, 19(2), 341-349. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0123-42262016000200011&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Arcos, A. L., & Narro, L. A. (2009). *Calosa como herramienta de selección para tolerancia del maíz al aluminio*. CIMMYT. <https://repository.cimmyt.org/handle/10883/805>
- Argote, G., & Ruiz, J. A. (2011). *Guía – Taller “Manejo y Conservación de la Avena Forrajera”*. Universidad Nacional Agraria La Molina Oficina Académica de Extensión y Proyección Social, AGROBANCO (p. 35). AGROBANCO.
- Baer, K. von. (1996). *Acercamiento económico a la problemática de la acidificación de los suelos del sur de Chile* [en línea]. Biblioteca INIA Santiago <https://biblioteca.inia.cl/discover?query=acidificaci%C3%B3n+del+suelo>
- Balta, R. A. (2019). El carbón activado y el biocarbón en la asimilación del cadmio por el tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo el invernadero. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio de la Universidad Nacional Agraria La Molina <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3874>
- Baltazar, A. (2016). *Obtención de biocombustible sólido de segunda generación a partir de tallos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) y hojas de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill), con máxima potencia calorífica* [Universidad Nacional del Altiplano]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/3250>
- Campillo, R., & Sadzawka, A. (2006). La acidificación de los suelos. Origen y mecanismos involucrados. En *Centro Regional de Investigación Carillanca* (Instituto de Investigaciones Agropecuarias, p. 17). <https://biblioteca.inia.cl/discover?query=la+acidificaci%C3%B3n+de+los+suelos.+origen+y+mecanismos+involucrados>

- Canihua, J. (1996). *Efectos del encalado sobre algunas características químicas de un suelo ácido en el cultivo de papa*. [Tesis de pregrado inédita]. Universidad Nacional del Altiplano.
- Castro, J. C. (2010). *Efecto de diferentes dosis de dolomita en la neutralización del aluminio intercambiable en un suelo muy ácido de supte san jorge*. [Universidad Nacional Agraria de la Selva]. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1101>
- Concilco, E., Moreno, A., García, M., Quiroga, H., & Ángel, O. (2018). Influencia del biocarbón aplicado al suelo sobre atributos de rendimiento y calidad de avena forrajera. *Terra Latinoamericana*, 36(3), 221-228. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.375>
- Dai, Z., Zhang, X., Tang, C., Muhammad, N., Wu, J., Brookes, P. C., & Xu, J. (2017). Potential role of biochars in decreasing soil acidification—A critical review. *Science of The Total Environment*, 581-582, 601-611. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.169>
- Dominchin, M. F., Verdenelfaoli, R. A., Vargas Gil, S., Aoki, A. M., Marin, R. H., & Meriles, J. M. (2019). *Efecto de la aplicación de biochar avícola sobre las propiedades químicas y microbiológicas de una suelo Haplustol típico con diferentes intensidades de uso*. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/96739>
- FAO. (2016). *Acidificación del suelo* (N.º 1; Estado Mundial del Suelo, p. 2). <https://www.fao.org/3/i6467s/i6467s.pdf>
- FAO. (2021). *Propiedades Químicas | Portal de Suelos de la FAO | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>
- Fassbender, H. W., & Bornemisza, E. (1994). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina* (2da ed.). IICA.
- Fiallos, L. R., Flores, L. G., Duchi, N., Flores, C. I., Baño, D., & Estrada, L. (2015).

- Restauración ecológica del suelo aplicando biochar (carbón vegetal), y su efecto en la producción de Medicago sativa. *Ciencia y Agricultura*, 12(2), 13-20.
<https://doi.org/10.19053/01228420.4349>
- Fraume, N. J. (2007). *Diccionario Ambiental*. Ecoe Ediciones.
- Gilces, M. A. (2014). *Efectos de la aplicación de biochar y cenizas en las propiedades del suelo* [Universidad de Valladolid]. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/6632>
- Guerra, P. A. (2015). *Producción y caracterización de Biochar a partir de la biomasa residual de sistemas agroforestales y de agricultura convencional en la Amazonía Peruana* [Universidad Nacional Agraria La Molina].
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/1895>
- Herrera, A. (2010). *Suelos: con énfasis del altiplano*.
- Iglesias, S. F. (2018). *Aplicación de Biochar a partir de biomasa residual de Eucalipto para evaluar la productividad con maíz en el austro ecuatoriano*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- INIA. (2007). *Avena forrajera inia 903—Tayko Andenes* (p. 2).
<https://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/641>
- INTAGRI. (2017). *La Conductividad Eléctrica del Suelo en el Desarrollo de los Cultivos*.
<https://www.intagri.com/articulos/suelos/la-conductividad-electrica-del-suelo-en-el-desarrollo-de-los-cultivos>
- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de Colombia.
<https://cupdf.com/document/introduccion-a-la-ciencia-del-suelo-55b0d36d699fd.html>
- Kannan, P., Marimuthu, S., Jayakumar, B., Swaminathan, C., & Paramasivan, M. (2021). Applying both biochar and phosphobacteria enhances *Vigna mungo* L. growth and yield in acid soils by increasing soil pH, moisture content, microbial growth and P availability. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 308, 107258.

- <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107258>
- Kochian, L. V., Hoekenga, O. A., & Piñeros, M. A. (2004). How Do Crop Plants Tolerate Acid Soils? Mechanisms of Aluminum Tolerance and Phosphorous Efficiency. *Annual Review of Plant Biology*, 55(1), 459-493. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141655>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (2.^a ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203762264>
- Liang, C., Zhu, X., Fu, S., Méndez, A., Gascó, G., & Paz-Ferreiro, J. (2014). Biochar alters the resistance and resilience to drought in a tropical soil. *Environmental Research Letters*, 9(6), 064013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/6/064013>
- Loayza, J. C. (2020). *Degradación de la fertilidad química y biológica del suelo por efecto del cultivo intensivo de la papa en Potreropampa, Andahuaylas, Apurímac* [Tesis doctoral, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/15922>
- Martínez, C. C. (2015). *Efectos de enmiendas de biochar sobre el desarrollo en Cucumis sativus L. Var. SMR-58* [Tesis de Maestría, Universidad de Guadalajara]. <http://repositorio.cucba.udg.mx:8080/xmlui/handle/123456789/5921>
- MINAM. (2017). *Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo*.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (Eighth edition). John Wiley & Sons, Inc.
- Nguyen, B. T., Le, L. B., Pham, L. P., Nguyen, H. T., Tran, T. D., & Van Thai, N. (2021). The effects of biochar on the biomass yield of elephant grass (*Pennisetum Purpureum* Schumach) and properties of acidic soils. *Industrial Crops and Products*, 161, 113224. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113224>
- Nieto, W. G. (2019). *Uso del biocarbón para reducir la compactación de un suelo*

- sobrepastoreado usando como indicador el rendimiento del Zea mays variedad INIA 616* [Universidad Nacional Intercultural de la Amazonía]. <http://repositorio.unia.edu.pe/handle/unia/213>
- Olmo, M. (2016). *Efectos del biochar sobre el suelo, las características de la raíz y la producción vegetal, España*. [Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba]. <https://helvia.uco.es/bitstream/handle/10396/13381/2016000001398.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Palomino, L. V. (2019). *La aplicación de biochar de residuos verdes y purín de cerdo y su efecto sobre el flujo de nitrógeno para el cultivo de tres cosechas de rábano (Raphanus sativus L.) en Lurín, Perú*. [Tesis Pregrado, Universidad Científica del Sur]. <https://repositorio.cientifica.edu.pe/handle/20.500.12805/850>
- Pennock, D., & Mckenzie, N. (2016). *Estado mundial del Recurso Suelo*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura.
- Porta, J., López, M., & Roquedo de Laburu, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente* (3ra ed.). Mundi-Prensa. https://catoute.unileon.es/discovery/fulldisplay/alma991008769488805772/34BUC_ULE:VU1
- Puma, F. D. (2022). Producción de avena forrajera (Avena sativa L.) con fertilización nitrogenada en el Centro Experimental—Illpa. *Universidad Nacional del Altiplano*. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/17662>
- Rivera, Y., Moreno, L., Herrera, M., & Romero, H. M. (2016). La toxicidad por aluminio (Al³⁺) como limitante del crecimiento y la productividad agrícola: El caso de la palma de aceite. *Revista Palmas*, 37(1), 11-23. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11696>
- Rodríguez, N., McLaughlin, M., & Pennock, D. (2019). *La contaminación del suelo: Una realidad oculta*.
- Sadeghian, S. (2016). La acidez del suelo una limitante común para la producción de

- café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 466, 1-12.
<https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/704>
- SENAMHI. (2017). *Manual de fases fenológicas* (4ta ed.).
https://www.google.com/search?q=senamhi+fases+fenol%C3%B3gicas+de+los+cultivos&rlz=1C1UEAD_esPE945PE945&oq=senamhi+fases+fenol%C3%B3gicas+de+los+cultivos&aqs=chrome..69i57j33i160j33i22i29i30.17777j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8
- Shetty, R., Vidya, C. S.-N., Prakash, N. B., Lux, A., & Vaculík, M. (2021). Aluminum toxicity in plants and its possible mitigation in acid soils by biochar: A review. *Science of The Total Environment*, 765, 142744.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142744>
- Trujillo, E., Valencia, C. E., Alegría, M. C., Césare, M. F., & Sotelo, A. H. (2019). PRODUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE BIOCHAR A PARTIR DE RESIDUOS ORGÁNICOS AVÍCOLAS. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(4), 489-504. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v85i4.262>
- Zapata, R. D. (2004). *LA QUÍMICA DE LA ACIDEZ DEL SUELO*.

ANEXO

Anexo 01. Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	V. Independiente
¿Cómo será la eficiencia de las diferentes dosis de biochar en la remediación de suelos agrícolas bajo invernadero - Puno 2019?	Evaluar la eficiencia de las diferentes dosis de biochar en la remediación de suelos agrícolas ácidos bajo invernadero - Puno 2019.	La aplicación de diferentes dosis de biochar tienen diferentes niveles de eficiencia en la remediación de suelos agrícolas bajo la acidez de suelos agrícolas bajo invernadero.	Diferentes dosis de biochar TO=0 % (Control), T1= 0.5 %, T2= 1 %, T3= 2 %, T4= 4%, T5= 8 % y T6= 16 %
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicos	V. Dependiente
¿Qué dosis de biochar será más eficiente para remediar la acidez del suelo agrícola bajo invernadero?	Determinar qué dosis de biochar será más eficiente para remediar la acidez del suelo agrícola bajo invernadero.	Existe una dosis de biochar más eficiente para remediar la acidez del suelo agrícola bajo invernadero.	Acidificación del suelo pH, C.E., Al, M.O, Ca y Mg. Materia verde (T/Ha).
¿Cómo será el efecto de las diferentes dosis de biochar en el cultivo de prueba bajo invernadero?	Determinar el efecto de las diferentes dosis de biochar en el cultivo de prueba bajo invernadero.	Existen dosis de biochar con mejores efectos en el cultivo de prueba bajo invernadero.	

Anexo 02. Certificados de análisis de suelos



ANALISIS DE CARACTERIZACION

Nombre: Betsy Ticona Encinas
 Proyecto:
 Fecha de Recepción: 14 de Octubre del 2019
 Caracterización de propiedades relativamente permanente del suelo.
 Fecha de Certificación: 25 de Octubre del 2019

Nº	Cod. Lab.	M A R C A S	ANALISIS MECANICO				CO ₂ Ca %	Yeso me/100g	Mat. Org. %	N. TOTAL %
			Arena	Arcilla	Limo	Textura				
			%	%	%					
1	313G5	Lote 4 M 4.1 Sub Lote 4.1.4.2,4.3	54,88	9,12	36,00	FA	0,00	1,50	0,07	
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

Caracterización del Estado de fertilidad y condiciones alterables del suelo.

Nº	Suelo: Agua 1:2.5		NUTRIENTES DISPONIBLES				Boro Soluble (ppm)	CATIONES CAMBIABLES					CIC me/100g	Suma Cationes
	pH	C.E. mmhos/cm	P (ppm)	K (ppm)	Mn (ppm)	Zn (ppm)		Al me/100g	Ca me/100g	Mg me/100g	Na me/100g	K me/100g		
	1	5,18	0,066	9,13	78,19				2,42	1,40	0,60	0,60		
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														

Referencias: Methods of analysis for soils, plants and waters. University of California, División of Agricultural Sciences E.U.A. Sexta reimpression, Octubre 1988. 195p.

Conclusiones: La muestra analizada de SUELO CUMPLE con los requisitos de documentos referenciales.(El informe sólo afecta a la muestra sometida a ensayo).

Nota: Cualquier corrección y/o enmendadura anula al presente documento.



ESTACIÓN EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
 Ing* JORGE GAMBHUA ROJAS
 Jefe Laboratorio Analisis
 S A L C E D O

www.inia.gob.pe

Rinconada de Salcedo s/n
 Puno, Puno, Perú
 T: (051) 363-812

Figura 07. Certificado de análisis de suelo inicial

Fuente: Laboratorio de análisis de aguas y suelos INIA (2019)



ANALISIS DE CARACTERIZACION

Nombre: Betsy Ticona Encinas.
 Proyecto:
 Procedencia:
 Fecha de Recepción: 31 de Mayo del 2021. Fecha de Certificación: 14 de Junio del 2021.
 Caracterización de Propiedades Relativamente Permanente del Suelo.

N°	Cod. Lab.	MARCAS	ANALISIS		MECANICO		CO ₂ Cu %	Mat. Org. %	N. TOTAL %
			Arena %	Arcilla %	Limo %	Textura			
1	319P3	BIT0						1.60	0.059
2	319P4	T1						1.03	0.038
3	319P5	T2						2.30	0.085
4	319Q1	T3						2.01	0.075
5	319Q2	T4						2.63	0.098
6	319Q3	T5						2.00	0.074
7	319Q4	T6						2.00	0.074
8	319Q5	BIIT0						1.77	0.066
9	319R1	T1						1.77	0.066
10	319R2	T2						2.00	0.074
11	319R3	T3						2.07	0.077
12	319R4	T4						2.49	0.090
13	319R5	T5						2.00	0.070
14	319S1	T6						2.11	0.078

Caracterización del Estado de Fertilidad y Condiciones AlterabS2.88les del Suelo.

N°	Suelo : Agua 1:2.5		NUTRIENTES DISPONIBLES				CATIONES CAMBIABLES					CIC	Suma Cationes
	pH	C.E. mmhos/cm	P	K			Al	Cu	Mg	Na	K		
			(ppm)	(ppm)			me/100g	me/100g	me/100g	me/100g	me/100g		
1	5.41	0.456	10.95	1818.05			2.55	0.80	1.60	0.06	1.34	6.80	9.35
2	5.62	0.887	9.98	3206.03			0.74	1.10	1.70	0.06	1.01	7.50	3.87
3	5.95	1.138	8.77	3421.07			0.18	2.40	1.10	0.06	1.35	6.40	4.91
4	6.64	1.084	8.60	4848.15			0.00	1.60	1.40	0.06	1.29	6.90	4.35
5	6.92	1.956	8.00	9363.97			0.00	1.40	3.70	0.06	1.30	6.70	6.46
6	8.42	4.07	8.23	15404.61			0.00	2.60	4.40	0.10	1.46	7.10	8.56
7	8.73	3.13	8.40	21288.86			0.00	3.30	5.70	0.14	0.51	6.30	11.10
8	5.23	0.692	11.90	1524.82			1.45	0.90	2.00	0.07	0.35	7.50	3.32
9	5.56	0.974	10.00	3421.07			0.60	0.30	2.60	0.07	0.44	6.90	3.41
10	5.89	1.237	9.13	3792.50			0.10	0.70	3.10	0.06	0.44	6.80	4.30
11	6.60	1.374	9.00	3987.99			0.00	0.30	2.80	0.07	0.45	6.20	3.62
12	7.70	1.534	9.00	7018.09			0.00	1.80	4.30	0.08	0.42	6.70	6.60
13	8.76	2.40	8.03	14427.16			0.00	2.00	6.30	0.08	0.45	3.10	8.83
14	10.03	4.10	8.53	20526.45			0.00	3.70	6.20	0.11	0.55	6.80	10.56

Métodos utilizados en el Laboratorio:
 Methods of analysis for soils, plants and waters. University of California, Division of Agricultural Sciences E.U.A. Sexta reimprisión, Octubre 1988. 195p.

Conclusiones:
 La muestra analizada de SUELO CUMPLE con los requisitos de documentos referenciales.

Nota:
 Cualquier corrección y/o enmendadura anula al presente documento. (El informe sólo afecta a la muestra sometida a ensayo)

La Rinconada Salcedo S/N°-Puno
 T: (051) 363 812
 www.inia.gob.pe
 www.minagri.gob.pe



INIA
 ESTACIÓN EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO

Ing° JORGE CAMARUA ROJ
 Jefe Laboratorio Análisis
 & ALICE DO



BICENTENARIO
 PERÚ 2021

Figura 08. Certificado de análisis de suelo final 01

Fuente: Laboratorio de análisis de aguas y suelos INIA (2021)



ANALISIS DE CARACTERIZACION

Nombre: Betsy Ticona Encinas,
 Proyecto:
 Procedencia:
 Fecha de Recepción: 31 de Mayo del 2021, Fecha de Certificación: 14 de Junio del 2021.
 Caracterización de Propiedades Relativamente Permanente del Suelo.

Nº	Cod. Lab.	MARCAS	ANALISIS		MECANICO		CO ₂ Ca %	Mat. Org. %	N. TOTAL %
			Arena	Arcilla	Limo	Textura			
			%	%	%				
1	319S2	BIJITO						1.50	0.055
2	319S3	T1						1.75	0.065
3	319S4	T2						2.03	0.075
4	319S5	T3						2.10	0.078
5	319T1	T4						2.60	0.097
6	319T2	T5						2.00	0.074
7	319T3	T6						2.00	0.074
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									

Caracterización del Estado de Fertilidad y Condiciones Alterab52.88les del Suelo.

Nº	Suelo : Agua 1:2.5		NUTRIENTES DISPONIBLES			CATIONES CAMBIABLES					CIC	Suma Cationes
	pH	C.E. mmh ₂ O/cm	P	K		Al	Ca	Mg	Na	K		
			(ppm)	(ppm)		me/100g	me/100g	me/100g	me/100g	me/100g		
1	5.10	0.727		1075.19		1.55	0.70	2.20	0.06	0.62	4.00	5.13
2	5.57	1.213		2404.52		0.56	0.80	2.10	0.06	0.90	4.80	3.86
3	5.87	1.544		3264.68		0.14	0.90	3.10	0.07	0.89	5.00	4.96
4	6.50	1.861		4418.07		0.00	1.40	3.50	0.07	0.86	6.10	5.83
5	7.09	2.00		6138.38		0.00	1.70	4.10	0.07	0.87	7.00	6.74
6	8.62	2.38		14153.47		0.00	1.70	6.90	0.09	0.95	7.90	9.64
7	10.16	4.40		19177.56		0.00	1.40	7.40	0.19	0.97	10.00	9.96
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												

Métodos utilizados en el Laboratorio:
 Methods of analysis for soils, plants and waters. University of California, División of Agricultural Sciences E.U.A. Sexta reimprisión, Octubre 1988. 195p.
 Conclusiones:
 La muestra analizada de SUELO CUMPLE con los requisitos de documentos referenciales.
 Nota:
 Cualquier corrección y/o enmendadura anula al presente documento. (El informe sólo afecta a la muestra sometida a ensayo)

La Rinconada Salcedo S/N°-Puno
 T: (051) 363 812
 www.inia.gob.pe
 www.minagri.gob.pe



ING. JORGE CANHUA BOWS
 Jefe Laboratorio Agrícola
 SALCEDO

ESTACIÓN EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO

BICENTENARIO PERÚ 2021

Figura 09. Certificado de análisis de suelo final 02

Fuente: Laboratorio de análisis de aguas y suelos INIA (2021)

Anexo 03. Análisis de varianza

Tabla 10. Análisis de varianza para la reacción del suelo (pH), porcentaje de aluminio intercambiable (Al), materia orgánica (MO) y materia verde de la avena (MV).

Fuente de variación	Variables	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F-Valor	Pr > ChiSq	Pr > F	Sig.
Tratamientos	pH	6	14	19.5	3.25	0.0034	0.0324	*
	Al ⁺⁺⁺	6	14	27.4	4.57	0.0001	0.0091	**
	MO	6	14	17	2.83	0.0093	0.0508	ns
	MV	6	14	19.32	3.22	0.0036	0.0334	*

** : altamente significativos, * : significativos, ns: no significativos

Tabla 11. Análisis de varianza para la conductividad eléctrica del suelo (CE)

Fuente de variación	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrados medios	F-Valor	Ft		Pr > F	Sig.
					0.01	0.05		
Tratamientos	6	23.7913	3.9652	16.34	4.46	2.85	<.0001	**
Error experimental	14	3.3972	0.2427					
Total	20	27.1885						

CV: 27.40 %

\bar{x} transformada: 1.80

R²: 0.88

Tabla 12. Análisis de varianza para el porcentaje de calcio intercambiable (Ca⁺⁺)

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados medios	F-Valor	Ft		Pr > F	Sig.
					0.01	0.05		
Tratamientos	6	0.6712	0.1119	0.66	4.62	2.92	0.6851	ns
Error experimental	14	2.3844	0.1703					
Total	20	3.0556						
CV: 10.01%		\bar{x} transformada: 4.12		R ² : 0.22				

Tabla 13. Análisis de varianza para el porcentaje de magnesio intercambiable (Mg⁺⁺)

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados medios	F-Valor	Ft		Pr > F	Sig.
					0.01	0.05		
Tratamientos	6	4.1325	0.6888	1.17	4.62	2.92	0.3754	ns
Error experimental	14	8.2382	0.5884					
Total	20	12.3708						
CV: 20.60 %		\bar{x} transformada: 3.72		R ² : 0.33				

Anexo 04. Panel fotográfico

Figura 10. Estación Experimental Agraria Illpa, anexo Salcedo - Puno.

Fuente: Adaptado de Google Earth (2021).



Figura 11. Estación Experimental Agraria Illpa, anexo Tahuaco - Puno.



Figura 12. Obtención de las muestras para el estudio experimental.



Figura 13. Tallo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) materia prima para la elaboración del biochar.



Figura 14. Biochar a partir de tallos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd)

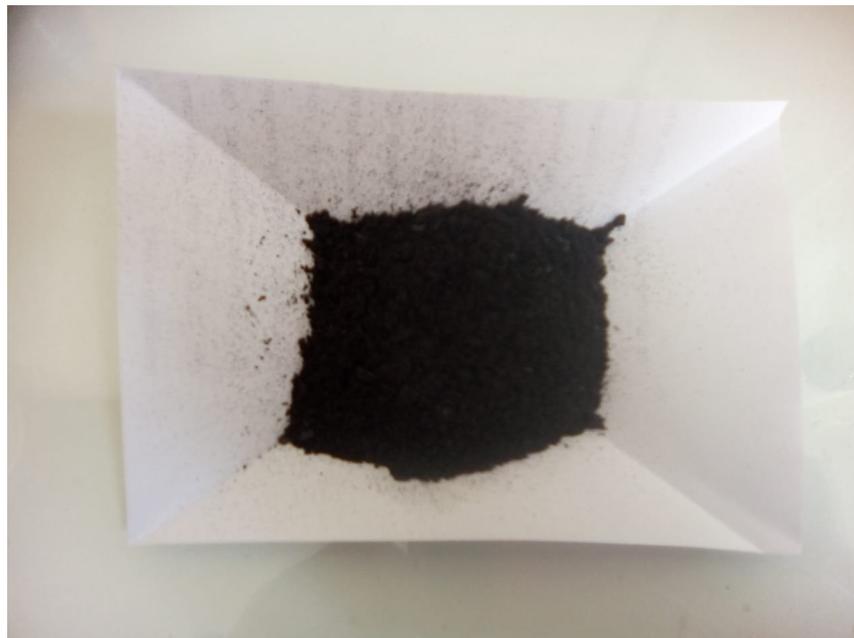


Figura 15. Biochar.



Figura 16. Instalación de las unidades experimentales.



Figura 17. Cultivo de prueba en fase fenológica tercera hoja.



Figura 18. Crecimiento del cultivo de prueba (avena).



Figura 19. Cultivo de prueba avena fase grano lechoso (RI).



Figura 20. Cultivo de prueba avena fase grano lechoso (RII).



Figura 21. Cultivo de prueba avena fase grano lechoso (RIII).



Figura 22. Raíces del cultivo de prueba.

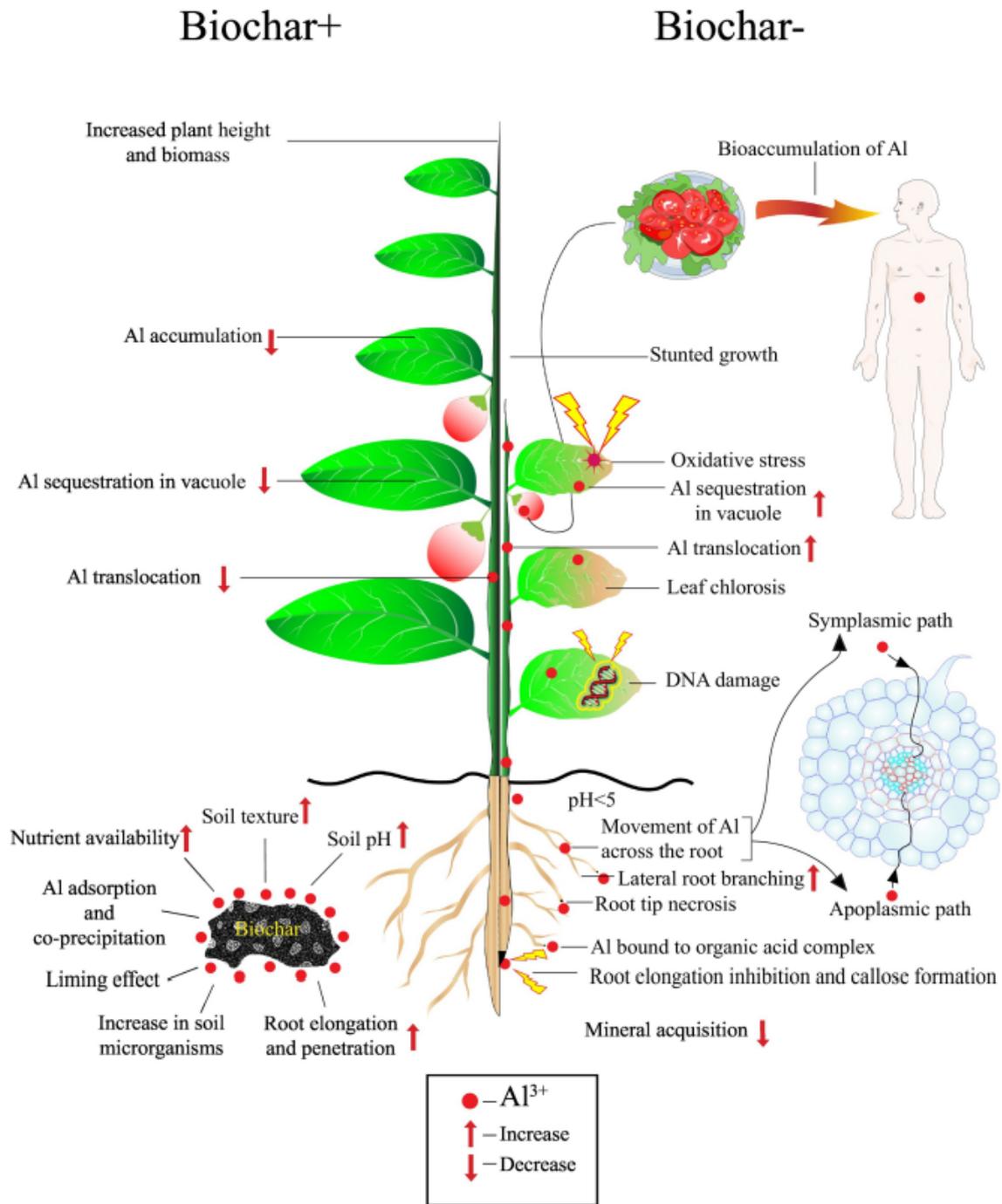


Figura 23. Efectos del aluminio en la planta con la aplicación de biochar y sin biochar.

Fuente: Shetty *et al.* (2021).