

**UNIVERSIDAD NACIONAL HERMILIO VALDIZAN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGRONOMICA**



**BIOCHAR COMO INMOVILIZADOR DEL CADMIO EN SUELO Y SU EFECTO  
EN EL GRANO DEL CULTIVO DE CACAO (*Theobroma cacao* L.) EN LA  
LOCALIDAD DE PUMAHUASI – HUANUCO.**

**TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO AGRONOMO**

**JUDITH CARMEN PALACIN AGÜERO**

**M. Sc. LILIANA VEGA JARA**

**ASESORA**

**HUANUCO – PERU**

**2020**

## **DEDICATORIA**

A mis padres Gloria Agüero y German Palacin por el amor, paciencia y apoyo incondicional que me brindan día a día, sin ellos este logro no hubiese sido posible. “los amo”.

A mí amado hijito Cristofer por ser mi soporte emocional y espiritual a lo largo de estos años.

A mis hermanos Rick, Cori y José que me alientan, guían a ser una mejor persona y un mejor ejemplo para ellos.

A mi primo y hermano Jairo por acompañarme y compartir conmigo momentos memorables en todos estos años “te extraño”.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por haberme acompañado, guiado y cuidado a lo largo de mi carrera y mi vida.

Mi eterno agradecimiento a la Ing. Mg. Sc. Liliana Vega Jara, por su paciencia, dedicación enseñanzas y todo el apoyo brindado en el patrocinio de la presente tesis.

Al señor Leónidas y familia por su colaboración con sus plantaciones de cacao y compartir sus experiencias en el cultivo.

A la dirección de transferencia e innovación de la UNHEVAL por el financiamiento de la investigación.

Al Ing. Wilson Castaneda Rodríguez por compartir sus conocimientos en Biochar.

A todos los docentes de la facultad de agronomía por compartir sus conocimientos y contribuir en mi formación profesional.

## RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto inmovilizador del biochar en la concentración de cadmio en suelo, hoja y granos del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en condiciones edafoclimáticas de Pumahuasi, los materiales y métodos fueron de tipo aplicada, nivel experimental, diseño experimental en bloques completamente al azar, la población constituida por 45 plantas de cacao, la muestra por 9 plantas de las que se extrajo 9 muestras de suelo, hoja y almendras. Los datos registrados fueron textura, materia orgánica, carbonato de calcio, capacidad de intercambio catiónico, pH, fósforo disponible, cadmio total y disponible en el suelo y la concentración de cadmio en hojas y granos de cacao, los resultados permiten concluir que no existió diferencia significativa entre los tratamientos respecto a la concentración de cadmio en granos atribuible al corto periodo de interacción del biochar con el suelo. El contenido de cadmio en los granos estuvo en el rango de 0,5 y 1,7 ppm por encima del límite máximo permisible establecido por la Unión Europea (0,5 ppm). El contenido de CaCO<sub>3</sub> predispone la exportación de cadmio a los granos ya que cuando en el suelo se reduce el CaCO<sub>3</sub> en 0,35 %, el cacao exporta 1 ppm de cadmio a los granos. La fuente principal de cadmio en los granos serían las hojas debido a que la concentración de Cadmio en los granos sube en 1 ppm cuando en las hojas se reduce 0.47 ppm.

**Palabras clave:** CaCO<sub>3</sub> en el suelo, Cd en hojas, interacción biochar-suelo-planta.

## SUMMARY

The objective of the research was to evaluate the immobilizing effect of biochar on the concentration of cadmium in soil, leaf and beans of the cocoa crop (*Theobroma cacao* L.) in edaphoclimatic conditions of Pumahuasi, the materials and methods were applied type, experimental level, Experimental design in completely randomized blocks, the population constituted by 45 cocoa plants, the sample by 9 plants from which 9 samples of soil, leaves and almonds were extracted. The data recorded were texture, organic matter, calcium carbonate, cation exchange capacity, pH, available phosphorus, total and available cadmium in the soil and the concentration of cadmium in leaves and cocoa beans, the results allow to conclude that there was no difference significant among the treatments regarding the concentration of cadmium in grains attributable to the short period of interaction of biochar with the soil. The cadmium content in the grains was in the range of 0.5 and 1.7 ppm above the maximum permissible limit established by the European Union (0.5 ppm). The CaCO<sub>3</sub> content predisposes the export of cadmium to the beans, since when the CaCO<sub>3</sub> is reduced in the soil by 0.35%, the cocoa exports 1 ppm of cadmium to the beans. The main source of cadmium in the grains would be the leaves because the concentration of Cadmium in the grains rises by 1 ppm when the leaves are reduced by 0.47 ppm.

**Key words:** CaCO<sub>3</sub> in the soil, Cd in leaves, biochar-soil-plant interaction.

## INDICE

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTO**

**RESUMEN**

<b>I. INTRODUCCION .....</b>	<b>8</b>
<b>II. MARCO TEORICO .....</b>	<b>10</b>
2.1. FUNDAMENTACION TEORICA.....	10
2.1.1. Biochar .....	10
2.1.1.1. Características del biochar .....	10
2.1.1.2. Impacto del biochar sobre las propiedades del suelo. ....	11
2.1.1.3. Biochar como inmovilizador de metales pesados. ....	13
2.1.2. Contaminación del suelo con metales pesados. ....	15
2.1.2.1. Fuentes de metales pesados.....	15
2.1.2.2. Disponibilidad de los metales pesados en el suelo.....	16
2.1.2.3. Factores que afectan la disponibilidad de metales pesados en el suelo. ....	16
2.1.2.4. Toxicidad de los metales pesados.....	17
2.1.2.5. Impacto ambiental de los metales pesados .....	18
2.1.3. Dinámica del cadmio en el suelo .....	18
2.1.3.1. El cadmio .....	18
2.1.3.2. Cadmio en suelos agrícolas .....	19
2.1.3.3. Cadmio en las plantas .....	20
2.1.3.4. Cadmio en el hombre .....	21
2.1.3.5. Cadmio en el cultivo de cacao.....	22
2.1.3.6. Límites máximos permisibles de cadmio en cacao .....	22

2.1.4. Condiciones edafoclimaticas del cacao .....	24
2.1.4.1. Clima.....	24
2.1.4.2. Suelo.....	25
2.2. ANTECEDENTES.....	28
2.3. HIPOTESIS.....	29
2.4. VARIABLES.....	30
<b>III. MATERIALES Y METODOS .....</b>	<b>31</b>
3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACION .....	31
3.2. LUGAR DE EJECUCION .....	32
3.3. POBLACION, MUESTRA Y UNIDAD DE ANALISIS. ....	32
3.4. TRATAMIENTO EN ESTUDIO.....	33
3.5. PRUEBA DE HIPOTESIS .....	34
3.6. MATERIALES Y EQUIPOS.....	41
3.7. CONDUCCION DE LA INVESTIGACION .....	41
<b>IV. RESULTADOS .....</b>	<b>44</b>
4.1. CONCENTRACIÓN DE Cd EN SUELO, HOJA Y GRANOS DEL CULTIVO DE CACAO. ....	44
<b>V. DISCUSION .....</b>	<b>53</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>61</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>62</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>78</b>

## I. INTRODUCCION

La ICCO (organización internacional del cacao 2020) ha calificado al Perú como país productor y exportador de cacao fino y aromático, logrando exportar el 36 % del que se produce a nivel mundial. Por lo cual el INVIMA (Instituto Nacional De Vigilancia De Medicamentos Y Alimentos 2016) menciona que debido a la importancia que el cultivo tiene, nace la necesidad de establecer, por los países de la Unión Europea los niveles máximos de cadmio en productos derivados del cacao. Esta normativa restringirá la comercialización de los granos de cacao con niveles superiores a los 0,80 mg kg-1 de cadmio (Hernández 2017).

El ISCR (International Symposium on Cocoa Research 2018) reporta que el cadmio es un metal pesado presente en suelo, agua y aire que termina depositándose en nuestros alimentos, cuando sobrepasa el nivel de ingesta tolerable perjudica la salud del ser humano por las características bioacumulativas de este elemento. El cadmio es uno de los metales que representa una amenaza para la humanidad ya que sus niveles en el ambiente han aumentado, lo que implica que las plantas lo absorban en mayores cantidades, concentrándola en las semillas, hojas y raíces (Baron 2016).

Herrera (2018) menciona que el uso de fertilizantes y pesticidas ha generado el incremento de cadmio en la solución del suelo provocando el incremento de Cd en los granos de cacao. Según Olmo (2016) debido a esta problemática, el Codex Alimentarius (2016) reporta que se necesita realizar investigaciones sobre medidas de mitigación y su correspondiente validación en las diferentes zonas donde se cultiva el cacao para poder prevenir y reducir la contaminación por cadmio de los granos de cacao.



El Biochar actúa como una esponja en el suelo adsorbiendo y reteniendo los compuestos presentes en la solución entre ellos los metales pesados, por la elevada cantidad de carbono orgánico presente en su composición. Cueto (2016) menciona que el biochar es altamente recalcitrante al ser aplicado a los suelos convirtiéndose así en un sumidero de carbono, evitando la posterior contaminación del suelo después de ser aplicado. Con la aplicación del biochar se llegó a determinar que el  $\text{CaCO}_3$  predispone la exportación de cadmio a los granos. El pH está fuertemente relacionado con la disponibilidad de cadmio en el suelo y su posterior concentración en los granos de cacao. Con la aplicación de biochar no se logró disminuir la concentración de cadmio en los granos de cacao porque los granos tuvieron valores sobre el límite máximo permisible establecidos por la Unión Europea, estos resultados son atribuidos al corto tiempo de interacción del biochar en el suelo con el cadmio.

Ante esta perspectiva el objetivo general fue evaluar el efecto inmovilizador del Biochar en la concentración de cadmio en suelo, hoja y grano del cultivo de cacao clon CCN51 (*Theobroma cacao* L.) en condiciones edafoclimáticas de Pumahuasi – Huánuco.

Evaluar el efecto de los niveles 10 y 20 g.kg<sup>-1</sup> de biochar en la concentración de cadmio total y disponible en el suelo del cultivo de cacao.

Evaluar el efecto de los niveles 10 y 20 g.kg<sup>-1</sup> de biochar en la concentración de cadmio en las hojas y granos del cultivo de cacao.

Relacionar las propiedades físicas y químicas de suelo con el contenido de cadmio en los granos de cacao.

## **II. MARCO TEORICO**

### **2.1. FUNDAMENTACION TEORICA**

#### **2.1.1. Biochar**

##### **2.1.1.1. Características del biochar**

Cely (2016) menciona que el biochar es una sustancia heterogénea rica en compuestos aromáticos y materia mineral, producida por pirolisis de una biomasa obtenida mediante condiciones controladas. El Biochar tiene alto contenido de carbono los denominados aromáticos, se caracterizan por ser unos anillos formado por 6 carbonos unidos entre sí, sin oxígeno e hidrogeno (Lehnman y Joseph 2009).

Desde el punto de vista de producción el biochar es un carbón vegetal altamente estable y altamente poroso obtenido mediante la descomposición térmica de materia orgánica bajo entorno con suministro de oxígeno limitado (O<sub>2</sub>) y ante temperaturas medias (< 700°C) (Guerra 2015).

Una de las particularidades del Biochar es el alto contenido de carbono orgánico. Estas estructuras de carbono se forman durante el proceso de pirolisis y son fundamentales a la hora de definir las propiedades como la mineralización y la adsorción de metales pesados. Las estructuras de carbono son altamente recalcitrantes contando con tiempos de residencia entre los 10 y 1000 veces superiores a los de otro tipo de materia orgánica (Méndez 2017)

La incorporación del biochar al suelo se considera como un sumidero de carbono (Lehmann y Joseph 2009) ya que más el 80 % del Carbono terrestre se encuentra almacenado en el (Swift, 2001 citado por Méndez 2017) el proceso de pirolisis estabiliza el carbón de la materia orgánica haciéndola más resistente a la descomposición química y biológica (Olmo 2016)

La materia prima a partir de las cuales se produce puede ser (residuos agrícolas, estiércoles, residuos forestales o biosólidos, siendo la biomasa maderera la más utilizada para la producción del biochar), siendo estas las responsables junto con otros factores de las propiedades que posteriormente presentara el biochar y que consecuentemente repercutirán en las características del suelo donde se aplica. (Méndez 2017)

Según Cely (2016) diversos estudios han demostrado que el contenido de carbono del biochar depende de la biomasa empleada. Por ejemplo, el biochar obtenido a partir de residuos forestales suele tener contenido en carbono mayores de 500 g/ kg-1 debido su alta cantidad de compuestos orgánicos muy estables, dichos compuestos no se degradan fácilmente al aumentar la Temperatura como el caso de la lignina.

#### **2.1.1.2. Impacto del biochar sobre las propiedades del suelo.**

Méndez (2017) sostiene que el biochar mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, asimismo el suministro y retención nutrientes, mejorando la fertilidad del suelo y su productividad. La mayoría de los biochar son alcalinos (pH >7)) y dependiendo de la cantidad aplicada al suelo pueden tener un efecto de encalado en el mismo. La elevada área superficial específica le confiere al biochar la capacidad de retener iones en su superficie. La porosidad es el responsable de la elevada capacidad de retención de agua del biochar.

La estructura porosa del biochar proporciona un hábitad adecuado para diversos microorganismos. Su alto contenido de carbonos aromáticos da lugar a reacciones de oxidación y reducción de gran importancia en la bioquímica del suelo ya que los microorganismos usan dichos carbonos aromáticos como receptores durante su metabolismo (Wilson 2014 citado por Cely 2016).

El biochar aumenta la capacidad de intercambio catiónico del suelo favoreciendo así la retención de nutrientes y evitando su pérdida por lixiviación. El biochar aumenta la porosidad del suelo mejorando así la

infiltración y su permeabilidad, contribuyendo de esa manera al desarrollo de la raíz, y a la respiración microbiana (Olmo 2016).

El color oscuro que le da el biochar al suelo con su aplicación favorece la absorción de las radiaciones solares aumentando su temperatura, aunque esto reduzca la humedad del suelo, sin embargo, su alta retención de agua lo compensa. En cuanto al contenido total de carbono el biochar tiende a aumentar el carbono los suelos tras ser aplicado no solo por ser una enmienda con alto contenido de carbono estable, sino también porque en su superficie se adsorbe el carbono junto con otros compuestos minerales. Esto se ha evidenciado en los suelos de terra preta (cuenca de las amazonas) que tras adicionar materia orgánica se logró retener mayor contenido del mismo en forma estable en el suelo (Cely 2016).

Olmo (2016) indica que la incorporación del biochar al suelo: Aumenta la capacidad de retención hídrica del suelo, asimismo, reduce la densidad aparente y compactación del mismo. Aumenta el pH y la conductividad eléctrica en menor medida de los suelos alcalinos; el biochar ayuda a que la raíz tenga mayor desarrollo longitudinal haciendo las raíces más finas y con tejido menos denso. Promoviendo de esa manera el crecimiento de la planta y la producción de frutos al facilitar un mayor acceso al agua y nutrientes.

Díaz (2017) indica que las respuestas de los cultivos a la adición de biochar en el suelo son variables de una especie a otra. Liu et al (2013) citado por Cely (2016) manifiesta que el biochar mejora la eficiencia de los fertilizantes empleados, mejorando directamente los cultivos.

Sik *et al* (2016) sostienen que la aplicación de biochar aumentó notablemente la retención de N, P del suelo, y la disponibilidad de P y K en los suelos; el aumento está positivamente relacionado con la tasa de aplicación del biocarbón. Los efectos de la aplicación de biocarbón en el pH del suelo están estrechamente relacionados con el tipo de materia prima de biocarbón y el proceso de pirolisis. Muchos estudios mostraron que la aplicación de biocarbones de alto pH condujo a un pH del suelo mucho mayor

en comparación con la aplicación de biocarbones de bajo pH (Existe una relación lineal positiva significativa entre el pH del biocarbón y el pH del suelo tratado con biocarbón, y la alcalinidad del biocarbón podría ser un factor clave para controlar el efecto de encalado en suelos ácidos.

Sin embargo es probable que la CIC de un suelo modificado con biocarbón cambie con el tiempo y el efecto de la adición de biocarbón en la CIC cambiaría con el tiempo, y el biocarbón envejecido tendría menos influencia en el suelo CIC nuestra comprensión mecanicista sobre los efectos del biocarbón en la fertilidad del suelo y la dinámica de nutrientes es todavía bastante limitada; por lo tanto, se necesitan urgentemente más investigaciones para mejorar la comprensión mecanicista de los efectos del biocarbón en las propiedades y procesos del suelo para ayudar a diseñar biocarburantes para aplicaciones específicas. Las interacciones entre el biocarbón, el suelo, los microorganismos y las plantas en suelos modificados con biocarbón pueden ser muy complejas, y todavía falta una comprensión mecanicista de esas interacciones (Sik *et al* 2016).

#### **2.1.1.3. Biochar como inmovilizador de metales pesados.**

Lehmann y Josseph (2009) mencionan que con la incorporación del biochar es posible controlar los niveles de los metales pesados evitando la contaminación de los suelos tratados. El biochar en si tiene la capacidad de retener los contaminantes disminuyendo su movilidad y biodisponibilidad lo cual genera las condiciones óptimas del entorno para los microorganismos beneficiosos del suelo al limitar la toxicidad de dichas sustancias sobre algunos microorganismos.

La inmovilización de los metales pesados está fuertemente relacionada con la CIC, con la capacidad de adsorción del biochar y especialmente con el aumento del pH, el cual produce una desprotonación (pérdida de cationes H<sup>+</sup>) de la superficie del suelo, incrementando su carga negativa y generando un aumento de la adsorción de iones metálicos en la superficie del biochar (Kim *et al* 2015 citado por Cely 2016)

El uso del biochar en la recuperación de suelos contaminados con metales pesados aumenta la producción de biomasa vegetal, disminuye la acidez en los residuos contaminantes, mejorando el pH la concentración de metales pesados, tanto en el suelo como en las plantas usadas para la fitoestabilización de los mismos. (Rodríguez Vila *et al* 2015 citado por Cely 2016)

Cely (2016) manifiesta que la reducción en la movilidad de los metales pesados varia de un metal a otro. Investigaciones concluyeron que con la aplicación de biochar producido a partir de tallos de maíz y fitorremediación, utilizando arbuscular mycorrhizae a los suelos contaminados, la reducción en el contenido de metales pesados en el cultivo de maíz fue del 45 al 56 % para el Cu, del 25 al 45 % para el Ni, Cr y Zn mientras que la reducción en el contenido de Pb y Cd fue del 10 al 20 %.

Sik *et al* (2016) mencionan que el biocarbón puede ser un adsorbente eficaz para la adsorción de muchos tipos de contaminantes orgánicos en suelos contaminados si las propiedades de biocarbón, suelo y pesticida están alineadas. La capacidad de sorción de biocarbón está influenciada por su biomasa de materia prima, las condiciones de pirólisis, los tipos de contaminantes y las propiedades del suelo. Cuando el biocarbón se aplica al suelo, su comportamiento de adsorción puede cambiar con el tiempo, y este envejecimiento puede resultar en una capacidad de sorción reducida del biocarbón. En el proceso de uso de biocarbón para remediar suelos contaminados con contaminantes orgánicos, también podría producirse un efecto adverso no intencional, como una reducción de la eficacia de los plaguicidas, por lo que la aplicación del biocarbón debe planificarse cuidadosamente.

Según Yu *et al* (2009) citado por Cely (2016) el biochar contribuye a la degradación, captura e inmovilización de los agentes contaminantes reduciendo su biodisponibilidad, y consecuentemente su contenido en las plantas disminuye. Este efecto es más efectivo tras la adición de biochar

producido a altas temperaturas ya que estos tienen mayor área superficial y mayor capacidad para capturar compuestos orgánicos.

### **2.1.2. Contaminación del suelo con metales pesados.**

Un elemento se considera metal pesado cuando tiene una densidad igual o superior a 5 g/cm<sup>3</sup> o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalinotérreos) y su presencia en la corteza terrestre es inferior al 0,1 % y casi siempre menor del 0,01 % (Álvarez y Fernández 2018).

Los metales pesados poseen carácter acumulativo es decir su concentración no disminuye con el tiempo, son tóxicos cuando exceden sus valores de concentración, aunque son necesarios en pequeñas cantidades para la planta, están presentes en los suelos a niveles de fondo, cuyo origen proviene del material original y no de un agente externo, con frecuencia se encuentran en forma de cationes interactuando con la matriz del suelo, incluso a altas concentraciones se encuentran en forma química inerte, sin embargo estos metales pueden cambiar de forma química y movilizarse debido a cambios medioambientales y cambios en el uso del suelo. La presencia en determinadas cantidades de metales pesados como el cadmio, mercurio, plomo y níquel, causan graves disfunciones orgánicas; porque son altamente tóxicos y se acumulan en los organismos vivos (Alvarez y Fernández 2018).

#### **2.1.2.1. Fuentes de metales pesados**

Sánchez et al (2011) mencionan que las elevadas concentraciones de metales pesados en el medio pueden deberse a causas naturales o acciones antrópicas entre estas tenemos:

##### *a) Causas naturales*

Erupciones volcánicas (emiten metales pesados HSO<sub>4</sub>, cenizas), evolución de suelos en climas húmedos donde el pH ácido favorece la solubilidad de los metales pesados, la alteración de los minerales primarios de las rocas que contienen metales pesados principalmente (Cr, Ni, Cu y Mn).

### *b) Acciones antrópicas*

Fundición de metales, actividades mineras, combustión de carbón entre otros. La actividad agrícola es una fuente antropogénica de cadmio con la aplicación de fertilizantes fosfatados en un 34 %, seguido por las fuentes naturales 21 % y la combustión de fósiles 21 %. También el uso de plaguicidas, estiércol, purines, compost y lodos provenientes de aguas residuales.

#### **2.1.2.2. Disponibilidad de los metales pesados en el suelo**

Álvarez y Fernández (2018) mencionan que los metales pesados se pueden encontrar en diferentes formas: Solubles en aguas, como cationes de cambio, complejados por la materia orgánica, en forma ocluida en óxidos de Fe y Mn, como minerales primarios, formando parte de las arcillas por sustituciones isomorfas del Fe y Al.

Los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir varios caminos: Pueden ser retenidos en el suelo, fijados por adsorción, complejacion y precipitación, también pueden ser absorbidos por las plantas e incorporarse a la cadena trófica, pueden pasar a la atmosfera por volatilización, pueden movilizarse a las aguas superficiales y subterráneas.

En la solución del suelo se encuentran más disponibles, debido a su pequeño tamaño y alta carga tienden a permanecer fuertemente adsorbidos, formando quelatos con compuestos orgánicos, y solo estarán disponibles si ocurre una alteración química en el suelo. Los riesgos producidos por los metales pesados son en función de su toxicidad y carácter acumulativo como el Hg, Cd, que presentan índices de biomagnificación en el suelo superior a 1.

#### **2.1.2.3. Factores que afectan la disponibilidad de metales pesados en el suelo.**

Sánchez *et al* (2011) sostienen que la biodisponibilidad de los metales depende de factores como: la solubilidad y movilidad de los metales en la solución suelo, solo los que están asociados a las fracciones solubles e intercambiables están realmente disponibles, es por eso que la concentración



de los metales en el suelo no refleja necesariamente la cantidad de metales biodisponibles para la absorción de las plantas, el pH condiciona la adsorción, la solubilidad y la disponibilidad de los metales pesados, la mayoría de los metales pesados están disponibles a pH ácido a excepción del arsénico, selenio y cromo, mientras que los suelos con pH básico presentan mayor adsorción de metales pesados. La disponibilidad y movilidad de los metales pesados en el suelo dependen del estado de oxidación en la que se encuentre en el suelo. El potencial Redox del suelo es el responsable de que el metal se encuentre oxidado o reducido. La cantidad y tipo de arcilla influye en la disponibilidad de los metales por la capacidad de intercambio catiónico que presenta.

La movilidad de los metales pesados aumenta con el incremento de la salinidad del suelo. La materia orgánica puede adsorber tan fuertemente a algunos metales pesados quedando así no disponible para las plantas. Los óxidos e hidróxidos de Fe y Al tienen una alta capacidad de fijar e inmovilizar los metales pesados. La presencia de carbonatos en el suelo tiende a precipitar y adsorber los metales pesados.

#### **2.1.2.4. Toxicidad de los metales pesados**

Navarro, Aguilar y López (2007) manifiestan que la toxicidad de los metales pesados depende de: La concentración, la forma química y la persistencia. Para determinar la toxicidad es necesario determinar la forma química en la que se encuentra. La causa primaria del elevado nivel de toxicidad es que los metales pesados tienen la capacidad de unirse con moléculas orgánicas (grupo sulfhidrilo, radicales amino, fosfato, carboxilo e hidroxilo); el resultado de estas uniones es perjudicial para la célula y otros fenómenos como: La acción sobre las proteínas por inhibición de la actividad o por disrupción de su estructura, deficiencia por el desplazamiento de elementos esenciales en el metabolismo y la catálisis de reacciones, que genera radicales libres que provocan fenómenos de estrés oxidativo.

### **2.1.2.5. Impacto ambiental de los metales pesados**

Son especies químicas no degradables por lo que una vez presente en el medio ambiente, sola puede distribuirse entre el aire, agua, suelo y cuando cambian su estado de oxidación algunos metales se incorporan a los seres vivos. Los procesos de adsorción y la formación de complejos son los responsables de la acumulación de los metales pesados en los sólidos en suspensión, incorporándose así a los sedimentos, que es donde se encuentran en mayor concentración los metales pesados (Vullo 2003).

### **2.1.3. Dinámica del cadmio en el suelo**

#### **2.1.3.1. El cadmio**

Herrera (2018) y Coronel (2018) indican que el cadmio es un elemento del grupo II B de la tabla periódica, su número atómico es 48 y posee una masa atómica de 112,40 g/mol tiene una densidad de 8,642 g/ cm<sup>3</sup>, de color blanco, blando, dúctil y maleable, situado entre el Zn y el Hg, por lo tanto, tiene características similares a estos dos elementos. Su ion monoatómico más estable es el Cd<sup>+2</sup>.

Sánchez *et al* (2011) en el suelo el cadmio se encuentra entre 1 a 3 mg/ kg de suelo. Kabata y pendias, (1984), citado por Herrera (2018) en suelos no contaminados el contenido de cadmio debe ser inferior a 1 mg/ kg. El nivel promedio de cadmio en el suelo es de 0,07 y 1,1 mg. Kg<sup>-1</sup>, con un nivel natural de 0,5 mg.kg<sup>-1</sup>.

Estupiñan (2014) una de las características notables del cadmio es su gran resistencia a la corrosión, bajo punto de fusión, y una excelente conductividad eléctrica. En el ambiente no se le encuentra como un metal puro, sino combinado con otros elementos como el oxígeno (óxido de cadmio), el cloro (cloruro de cadmio) o el sulfato (sulfato de cadmio). El cadmio tiene una vida extremadamente larga.

En la naturaleza se le encuentra asociado al zinc, cobre y plomo. Presenta gran afinidad con el azufre, de allí que su compuesto más común es el CdS, otros compuestos comunes son: CdO, CdCl<sub>2</sub>, Cd (OH)<sub>2</sub>. El cadmio

se utiliza en la fabricación de baterías, pinturas, como componente de aleaciones para soldadura y en la industria química en procesos catalíticos (Herrera 2018).

#### **2.1.3.2. Cadmio en suelos agrícolas**

Sánchez *et al* (2011) indican que el cadmio es un metal no esencial y poco abundante en la corteza terrestre, pero debido a las actividades antropogénicas se ha incrementado en el suelo. La dinámica del cadmio está relacionada con los procesos de adsorción y desorción que dependen de la forma química y propiedades físicas - químicas del suelo, también están relacionados con el pH y la presencia de fosfatos. La disponibilidad de cadmio en el suelo determina su posible absorción por los cultivos como su lixiviación y posterior infiltración a las aguas subterráneas. La capacidad de adsorción del cadmio tiene relación con las clases texturales, CIC, materia orgánica, pH ácido y alto contenido de calcio (lo que genera problemas de translocación del metal a la planta o lixiviación a aguas subterráneas).

Herrera (2018) y Bonomeli *et al* (2018) mencionan que una de las vías de incorporación de cadmio es la fertilización fosforica ya que la principal materia prima para la fabricación de los fertilizantes fosfóricos es la roca fosfórica, la cual está constituida por apatita, que además de P contiene de 8 y 500 mg.kg<sup>-1</sup> de Cd y su aplicación reitera incrementa las cantidades de Cd en el suelo, su movilidad en los suelos y la facilidad con que es absorbido por las plantas

La absorción del cadmio depende de factores del suelo y el cultivo, mientras mayor sea el pH mayor será su retención del cadmio, la presencia de carbonatos también contribuye en la retención en formas poco disponibles para la planta, la mineralogía del suelo también es otro factor determinante en la disponibilidad de Cd para las plantas. La capacidad de intercambio catiónico alta en suelos ayuda a la retención de Cd en los suelos por el contrario la materia orgánica tiene efectos opuestos en la disponibilidad de Cd (Herrera 2018).

McLaughlin & Singh (1999) citado por Bonomeli *et al* (2018) sostienen que la disponibilidad y movilidad del Cd en el suelo dependen del pH, humedad, Materia orgánica, tipo y cantidad de arcilla además de la cantidad y número de años de aplicación de fertilizantes fosforados.

### **2.1.3.3. Cadmio en las plantas**

El comportamiento de las plantas superiores frente a los metales pesados no es igual en todas las plantas, incluso las variedades difieren entre sí en su capacidad para absorber los metales, acumularlos y tolerarlos. Las plantas se han clasificado en tres tipos: excluyentes, indicadoras y acumuladoras ante la presencia de los metales pesados. Las excluyentes restringen la entrada o translocación de metales tóxicos, esto les permite vivir en ambientes con elevadas concentraciones de metales. Las indicadoras reflejan el incremento de metales producidos en el entorno. Por último las acumuladoras incrementan activamente metales pesados en sus tejidos. El cadmio puede ser absorbido por las plantas como  $Cd^{+2}$  y se encuentra en mayor cantidad en la lechuga, espinaca, nabo y apio. Recientemente se ha reportado que el frijol acumula Cd en las raíces (Bonomeli *et al* 2018).

La capacidad de la planta para bioacumular metales varía según la especie vegetal y la naturaleza de los contaminantes. Esta diferencia en la absorción puede ser el resultado de la capacidad de retención del metal por el suelo, al cultivo, a la interacción planta – raíz- metal y al metabolismo vegetal (Prieto 2006, citado por Tanatalean 2017).

La absorción del cadmio por las plantas se ve facilitada por sustancias ácidas (exudados radiculares principalmente el ácido carboxílico) que se producen en la rizosfera entre otros factores tenemos: la especie, la edad y el desarrollo radicular. La presencia de cadmio en las plantas limita la absorción y translocación de otros elementos dentro de la planta cuando forman iones divalentes como calcio, magnesio, zinc, hierro y manganeso, asimismo interfieren en la respiración y la fotosíntesis, por la acumulación de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) iones peróxido ( $O_2$ ) e hidróxido ( $OH^-$ ) y radicales libres. La disminución de crecimiento de las plantas es un síntoma de contaminación

por cadmio de las plantas también la clorosis, hojas arrugadas y con coloración marrón rojiza, la aparición de estos síntomas solo ocurre a muy elevadas concentraciones del elemento (Bonomeli *et al* 2018).

Las plantas han desarrollado mecanismos específicos para absorber, traslocar y acumular sustancias. Sin embargo, algunos metales pesados son absorbidos traslocados y acumulados en la planta debido a que presentan un comportamiento electroquímico similar a los elementos nutritivos requeridos por la planta (Prieto, 2009 citado por Tantalean 2017).

Rodríguez *et al* (2008) citado por Tantalean (2017) indica que entre las proteínas responsables de la entrada del cadmio a las células vegetales destacan el transportador de calcio LCT1, y a proteína IRT1. El cadmio se acumula preferentemente en la raíz quedando secuestrado en la vacuola de las células, y solo una pequeña parte es transportada a la parte aérea de la planta concentrándose en forma decreciente en tallos, hojas, frutos y semillas.

Pernia *et al* (2008) citado por Tantalean (2018) manifiesta que el cadmio puede ser transportado a través de los transportadores de  $Fe^{+2}$   $Ca^{+2}$  y  $Zn^{+2}$  luego son capturados por las células de las raíces, donde se unen inicialmente a la pared celular de las células epidérmicas y después por intercambio iónico al resto de la planta.

#### **2.1.3.4. Cadmio en el hombre**

El cadmio es muy tóxico para la salud humana, suministrada en cantidades superiores a los permisibles. (0,038 mg/100ml) puede llegar a afectar el hígado y riñones ya que es allí donde frecuentemente se acumula. Según la OMS no se debe de ingerir más de 400 a 500 mg de cadmio por persona a la semana. Los alimentos cultivados en suelos con alta concentración de metales pesados acumulan elementos tóxicos en sus órganos vegetales y de esa manera se transmite al ser humano cuando es ingerido (Coronel 2018).

### **2.1.3.5. Cadmio en el cultivo de cacao**

Según el PNUMA (2010) citado por Jaramillo (2018) desde hace aproximadamente 12 años existe una discusión sobre los niveles de cadmio detectados en el cacao importado por Europa y procedente de Latinoamérica, por lo que la unión europea pretende bajar los mínimos aceptables de las cantidades de cadmio que se depositan en la cascara. (Huamani *et al* 2012. Citado por Tantalean 2017) menciona que la planta de cacao absorbe el cadmio del suelo y los concentra en las semillas

Tantalean (2017) el cadmio se distribuye de manera desigual en los órganos de las plantas encontrando que la mayor cantidad de cadmio en el jugo y a la pulpa (mucilago) del cacao.

Guzman (2019) manifiesta que la materia orgánica reduce la absorción de cadmio en las hojas de los plantones de cacao con la aplicación de 1,07 %. La concentración de cadmio total y disponible en el suelo esta correlacionado con las hojas.

Según Chávez (2020) al incrementar el contenido de Ca, Mg y Zn en el suelo se limita la absorción del cadmio disponible del suelo por la planta reduciendo su presencia en las almendras del cacao. Florida (2018) menciona que el contenido de cadmio en las almendras del cacao no está relacionado con pH del suelo.

Tantalean (2017) sostiene que el tallo del cacao presenta mayor contenido de cadmio seguido por las hojas, raíces, almendras y cascara. El cadmio disponible se encuentra a una profundidad de 0 a 10 cm del suelo en suelos residuales y en suelos aluviales el mayor contenido de cadmio disponible se encuentra a una profundidad de 60 a 85 cm.

### **2.1.3.6. Límites máximos permisibles de cadmio en cacao**

Cárdenas (2012) indica que en la provincia Leoncio Prado, región Huánuco, determino que las almendras del cacao de parcelas de esta zona revelaron niveles superiores al permitido (0,50 ppm) lo cual puede limitar su exportación.

La legislación revisada en 23 países, teniendo en cuenta a la Comunidad Europea como un solo país, el 22 % tienen legislado el cadmio en el chocolate y/o sus derivados. Se resalta a Suiza porque, siendo el mayor consumidor del mundo, no tiene una normativa para este contaminante; no obstante, 11 de los 23 países que pertenecen a la Unión Europea están dentro de los mayores consumidores de este producto en el mundo, siendo ésta una de las razones por las cuales Europa, especialmente Alemania, comenzó a liderar en los estados miembros, la reglamentación de este contaminante en el chocolate y sus productos derivados. (Giménez 2015)

ISCR (2017) reporta que el reglamento UE 488/2014 cuya entrada en vigor está prevista a partir del 2019, establece la normativa para Cd en cuanto a tipos de chocolate, estimo que la ingesta de Cd a través del chocolate equivale de 0,02 a 1,6 % de la ingesta mensual tolerable. De hecho, no se conoce actividad fisiológica normal del cadmio, por tanto, cuando se encuentra dentro del organismo humano o de cualquier otra especie, se trata de un intruso o contaminante, pero que bajo ciertos niveles de (Ingesta Tolerable Probable o ITP), el organismo es capaz de tolerar y/o desechar. Para el caso del cadmio los valores suelen estar dados en microgramos por kilogramo de peso corporal al mes ( $\mu\text{g}/\text{Kg.pc/m}$ ).

González (2016) de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y agricultura (FAO) los límites máximos permisibles en cadmio son:

**Cuadro 1.** Organizaciones reguladoras de la concentración de cadmio en los alimentos.

Instituciones reguladoras	Concentraciones de cadmio (mg/kg)
Comisión de Codex alimentarius (CAC)	0,1
Organización mundial de la salud (OMS)	0,1
American environmental safety institute (AESI)	0,002 – 0,136

Actualmente la unión europea ha regulado el contenido de cadmio permisible en los productos derivados del cacao como se muestra:

**Cuadro 2.** Niveles máximos permitidos de cadmio en chocolate y cacao en polvo.

<b>Productos</b>	<b>Niveles máximos permitidos de Cadmio (ppm) desde el 1 de enero del 2019</b>
Chocolate con leche con contenido de materia seca total <30%	0,10
Chocolate con contenido de materia orgánica seca total de cacao > 50%	0,30
Chocolate con un contenido de materia seca total de cacao >30% <50%.	0,80
Cacao en polvo vendido al consumidor final o como ingrediente de cacao en polvo edulcorado vendido al consumidor final. (chocolate para beber)	0,60

Fuente: Unión Europea (2014).

#### **2.1.4. Condiciones edafoclimaticas del cacao**

##### **2.1.4.1. Clima**

La planta de cacao crece en bosques húmedos tropicales con altitudes por debajo de los 1 300 msnm donde el clima es cálido y húmedo durante casi todo el año. La temperatura y la precipitación son factores críticos para su normal desarrollo. Otros factores que se deben de considerar son: viento, humedad relativa, luz, sombra y el factor ecológico suelo (Saavedra *et al.* 2004).

En Perú el cacao crece mejor en las zonas tropicales cultivándose desde el nivel del mar hasta los 800 metros de altitud, sin embargo, en



latitudes cercanas al ecuador las plantaciones se desarrollan normalmente en mayores altitudes, desde los 1 000 a los 1 400 msnm. El cultivo presenta necesidades de humedad relativa anual promedio de entre el 70 % y 80 % (Arvelo 2017)

*a) Temperatura*

La temperatura es importante para la floración, fructificación del cultivo de cacao. Asimismo, controla la actividad de las raíces y los brotes de la planta. Requiere una temperatura media anual de 25 °C, siendo la mínima 23 °C y la máxima 32 °C y la óptima 25 °C (Avedaño *et al* 2011).

*b) Precipitación*

La periodicidad de las lluvias es el principal factor climático que induce la apertura de los brotes vegetativos y estimula la floración. La planta de cacao es sensible tanto a los escasos como al exceso de agua. Una pluviosidad de 3 500 mm/año ocasiona un bloqueo en el drenaje y en la absorción de nutrientes. La precipitación oscila entre 500 – 2 500 mm/año en zonas de trópico húmedo y de 1 000 – 1 500 mm/año en las zonas más templadas o en los valles más altos. La precipitación más adecuada es la que oscila entre los 1 200 -2 500 mm/año (Avedaño *et al* 2011).

*c) Luminosidad*

La luminosidad varía dependiendo del ciclo productivo. Las plantas jóvenes en formación necesitan de 40 a 50 % de luz y de 60 a 75 % las plantas desarrolladas o adultas (Saavedra *et al* 2004).

*d) Humedad*

Los niveles de humedad óptimos oscilan entre 50 – 70 %. El cacao requiere de una humedad atmosférica elevada. Se considera que la humedad relativa no debe de ser inferior a un 60% durante el día sobre todo en la estación seca (Avedaño *et al* 2011).

#### **2.1.4.2. Suelo**

Debido a que el cacao desarrolla 95 % de sus raíces en los primeros 60 cm de profundidad, en los primeros 30 cm es donde se encuentra

el mayor porcentaje de raíces encargadas de la absorción de agua y nutrientes. Por eso es necesario tener en cuenta que la profundidad del suelo sea mayor a 80 cm hasta los 1,5 m (Avedaño *et al* 2011). El suelo debe tener una buena capacidad de retención de humedad, buena aireación, buen drenaje, con un espacio radical de 1 m de profundidad en la capa superior donde las raíces puedan desarrollarse con toda normalidad. (Batista 2009)

Enríquez (1987) menciona que las características principales que se deben examinar al evaluar un suelo para cacao son: la cantidad de hojarasca de la capa superficial, el espesor de la capa húmica, el espesor y la porosidad de la capa inferior y el origen de suelo.

a) *Textura*

Enríquez (1985) los suelos para el cultivo de cacao comprenden desde arcillosos hasta franco arenosos. Las texturas intermedias que van desde franco arcillosas a franco arenosas son óptimas para el cacao en la mayoría de los casos. Incluso en zonas de mucha lluvia, los suelos de textura limosa son preferibles a los de textura arenosa, porque tienen poca retención de nutrientes.

b) *Drenaje y aireación*

Uno de los factores esenciales para el crecimiento de las raíces del cacao es una buena aireación, es decir una renovación permanente del oxígeno del suelo. En un suelo donde el agua no se evacua rápidamente para dejar libres los poros, las plantas de cacao mueren. En general las raíces toleran inundaciones por cortos periodos. Es así que una capa freática de fluctuación rápida no afecta el crecimiento de las raíces, siempre que se restituya la oxidación en un tiempo más o menos corto (Enríquez y Paredes 1992).

Enríquez (1987) indica que la retención de agua por el suelo es un factor importante. El agua puede infiltrarse rápidamente o permanecer en la superficie por mucho tiempo; los dos extremos son peligrosos para el cacao. En el primer caso un adecuado sombreado y una buena capa húmica

(mucho hojarasca) puede mejorar la retención del agua. En el segundo caso, un buen sistema de drenaje (zanjas) será necesario para eliminar el exceso de agua. Por lo tanto, no es recomendable sembrar el cacao en: suelos pantanosos anegadizos, suelos de pendientes muy fuertes, suelos muy pedregosos, suelos poco profundos, pobres y suelos arenosos.

*c) Capacidad de intercambio catiónico*

Los suelos para el cacao deben tener ciertos equilibrios aniónicos y catiónicos. Las bases intercambiables en el suelo deben representar al menos el 35% de la capacidad total de intercambio catiónico (CIC), de lo contrario es probable que surjan problemas nutricionales. La relación óptima de nitrógeno total / fósforo total debería ser de alrededor de 1,5 (ICCO. 2020).

*d) pH*

El cacao es tolerante a los suelos ácidos, siempre que el contenido de nutrientes sea lo suficientemente alto (IICO 2020). El pH regula la velocidad de descomposición de la materia orgánica, así como la disponibilidad de los nutrientes del suelo. El pH óptimo es de 6,0 a 6,5. Sin embargo también se adapta a rangos extremos de 4,5 desde los muy ácidos hasta los muy alcalinos (4,5 – 8,5). (Savendra *et al.* 2004). No tolera niveles altos de aluminio y requiere buen nivel de calcio cambiante (Cerrón 2012).

*e) Materia orgánica*

El porcentaje de materia orgánica y las concentraciones de potasio, magnesio y calcio alcanzan niveles bastante altos, con valores de 3,2 %, 0,3 meq /100 ml de suelo, 4,3 ppm y 18 ppm de calcio respectivamente (Batista 2009).

El cacao es altamente exigente en nutrientes. La cantidad extraída por la planta está directamente relacionada con su desarrollo, los elementos que más absorben son: potasio, nitrógeno y calcio, de estos el potasio siempre es requerido en mayor cantidad salvo en los primeros meses de desarrollo (INIAP Estacion Experimental Tropical Pichilingue 1998)

## 2.2. ANTECEDENTES

Balta (2019) en *efecto del carbón activado y el biocarbon en la asimilación del Cd por el tomate bajo invernadero* concluye que el carbón activado fue más eficiente que el biocarbon en reducir la disponibilidad de Cd en las plantas de tomate debido a la mayor área y carga superficial que presenta. La absorción de Cd en raíz, tallo, hoja y fruto, fueron menores en las plantas tratadas con carbón activado que en plantas tratadas con biocarbon. Evidenciando que el carbón activado es más eficiente que el biocarbon en la absorción del Cd. También manifiesta que la absorción de N, P, Ca y Mg fue mayor en plantas tratadas con carbón activado, evidenciando que el biocarbon es más eficiente en el suministro de nutrientes.

Bravo *et al* (2019) en *el uso de biocarbono sobre la absorción de Cadmio en el suelo y la productividad de cultivo de cacao en la Amazonia Ecuatoriana* concluye que el contenido de cadmio disponible en el suelo inicial y final, exhibió concentraciones consideradas como bajas al compararla con el valor crítico (2 mg kg<sup>-1</sup>) con una reducción del 99% con la aplicación del biocarbono. Los valores respecto a la concentración de Cd en las almendras para ambas fechas, resultó ser bajo cuando se comparó con el nivel de referencia (1 mg kg<sup>-1</sup>), por tanto, con la aplicación del biocarbono, existió una disminución del Cd en la almendra de 97 % aproximadamente con respecto al valor inicial.

Khan (2017) en *la aplicación de biocarbón derivado del estiércol de vaca como enmienda del suelo para reducir la disponibilidad de cadmio y la acumulación por Brassica chinensis L. en suelo rojo ácido* concluye que la aplicación de biocarbón tiene el potencial de disminuir el contenido de Cd en el suelo constituyendo así una ruta sostenible para disminuir la disponibilidad de Cd en el suelo. Así mismo concluye que la aplicación de Biochar aumento el pH del suelo, la producción de biomasa vegetal y las concentraciones de trazas de metales en el suelo y en la planta.

Vásquez (2020) en *el efecto de carbón activado de semillas de aguaje en la estabilización de Cadmio en el suelo y su acumulación en tejidos de*

*plantones de cacao* concluye que el carbón activado de semillas de aguaje estabiliza el Cd en el suelo y que, incluso agregando una menor dosis, se puede lograr una buena estabilización del Cd en el suelo. Sin embargo, el carbón activado de semillas de aguaje como estabilizador de cadmio en el suelo es excelente, pero no se puede llegar a la misma conclusión con respecto al efecto del carbón en los tejidos, porque aún en concentraciones elevadas de carbón activado la planta absorbe y acumula grandes porcentajes de cadmio, incluso mayores al testigo donde no se utilizó carbón activado.

Suppadit *et al* (2012) en *efecto del biocarbon producido de la hojarasca de codorniz (QLB) sobre la productividad de cuatro nuevas variedades de frutos secos plantados en suelos contaminados con Cd* concluye que el QLB tiene el potencial de disminuir la disponibilidad de Cd para las plantas de frutos secos. También menciona que La adición de QLB permitió que la humedad del suelo tuviera un tiempo de residencia más prolongado dentro de la zona de la raíz, lo que hizo los nutrientes del suelo estuvieran más disponibles para las plantas en crecimiento y, finalmente, mejorara la productividad de los cultivos.

### **2.3. HIPOTESIS**

#### **a) Hipótesis general**

Si, aplicamos biochar al cultivo de cacao clon CCN51, entonces tendremos efecto significativo en la disminución del cadmio en el suelo y planta en condiciones edafoclimáticas de Pumahuasi – Huánuco.

#### **b) Hipótesis**

##### **específicas**

- Si aplicamos los niveles 10 y 20 g.kg<sup>-1</sup> de biochar, entonces disminuirá significativamente el cadmio disponible y total en el suelo.
- Si aplicamos los niveles 10 y 20 g.kg<sup>-1</sup> de biochar, entonces, disminuirá significativamente el cadmio total en planta (hojas y granos.)

- Las características del suelo están relacionadas significativamente con el contenido de cadmio en los granos de cacao.

## 2.4. VARIABLES

**Cuadro 3.** Variables, dimensiones e indicadores

<b>Variables</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>
<b>Independiente</b> Biochar	Niveles	10 g/kg-1 20 g/kg-1
<b>Dependiente</b> Concentration de cadmio	Suelo	Cadmio disponible Cadmio total
	Planta	Cd total en hoja Cd total en granos
<b>Interviniente</b> Condiciones edafoclimaticas.	Clima	Temperatura, radiación solar, precipitación.
	Suelo	Textura, capacidad de intercambio catiónico, pH, materia orgánica, carbonatos, fosforo disponible.

### **III. MATERIALES Y METODOS**

#### **3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACION**

##### **Tipo de investigación**

Aplicada porque se recurrió a los principios de la ciencia del suelo (propiedades físicas – químicas del suelo) química ambiental (contaminación y remediación del suelo) y cultivos tropicales (condiciones edáficas del cacao) para solucionar el problema del alto contenido de cadmio en el suelo y planta (hojas y almendras) de cacao con la aplicación del biochar. Sustentado en Sanchez Carlessi (1998) indica que la investigación aplicada se caracteriza por su interés en la aplicación de los conocimientos teóricos a determinada situación concreta y constituye el primer esfuerzo para transformar los conocimientos científicos en tecnológicos.

##### **Nivel de investigación**

Experimental porque se manipulo la variable independiente (niveles de biochar), se midió la variable dependiente (concentración de cadmio total y disponible en el suelo, cadmio en las hojas y granos de cacao), y se comparó con un testigo (sin aplicación de biochar). Sustentado en Hernández y otros (2014), quien afirma que un estudio en el que se manipula intencionalmente una o más variables independientes para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes, dentro de una situación de control para el investigador.

### 3.2. LUGAR DE EJECUCION

La investigación se realizó en la localidad de Pumahuasi, cuya ubicación política y geográfica es la siguiente:

#### **Ubicación política**

Región	: Huánuco
Provincia	: Leoncio Prado
Distrito	: Daniel Alomía Robles
Localidad	: Pumahuasi
Centro poblado	: Huamancoto

#### **Ubicación geográfica**

Latitud sur	: -9° 12' 25.07" S
Longitud Oeste	: -75° 56' 17.04" W
Altitud	: 664 msnm
Zona de vida	: Bosque Muy Húmedo Subtropical (Bmh-ST)

Según Villanueva (2008) Huamancoto presenta una temperatura que oscila entre 18 – 28 °C, con una precipitación anual de 3200 mm/año.

### 3.3. POBLACION, MUESTRA Y UNIDAD DE ANALISIS.

#### **Población**

Constituido por 45 plantas de cacao del clon CCN51 de 8 años de edad, con desarrollo uniforme y una producción de 2 cosechas por año.

#### **Muestra**

Conformada por 9 plantas de cacao, del área neta experimental con 9 muestras de: suelo, hoja y almendras respectivamente.



### **Tipo de muestreo**

Probabilístico en su forma de muestreo aleatorio simple (MAS) porque cualquier parte del suelo y planta (hoja y granos) del área neta experimental tuvieron la misma oportunidad de formar parte de la muestra.

### **Unidad de análisis**

Constituido por las muestras de suelo tomadas del área circundante a la planta de cacao (a una profundidad de 30 cm) y una planta de cacao de las que se tomó muestras de hojas y mazorcas de las que se extrajo los granos.

## **3.4. TRATAMIENTO EN ESTUDIO**

### **Cuadro 4. Factor y tratamientos**

El factor y tratamientos se indican a continuación

<b>Factor</b>	<b>Tratamientos</b>
Biochar	T1: Testigo sin aplicación T2: Aplicación de Biochar a dosis (10g. kg <sup>-1</sup> ) T3: aplicación de Biochar a dosis de (20 g. kg <sup>-1</sup> )

### 3.5. PRUEBA DE HIPOTESIS

#### 3.5.1. Diseño de la investigación

Experimental en su forma de Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA) con 3 repeticiones, tres tratamientos haciendo un total de 9 unidades experimentales.

Para la cual se usó la siguiente ecuación lineal.

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \ell_{ij}$$

Para  $i = 1, 2, 3, \dots, t$  ( $N^\circ$  de tratamientos)

$j = 1, 2, 3, \dots, r$  ( $N^\circ$  de repeticiones, bloques)

**Dónde:** Unidad experimental que recibe el tratamiento  $i$  y está

$Y_i$  = en el bloque  $j$ .

$\mu$  = Media general a la cual se espera alcanzar todas las observaciones (media poblacional).

$\tau_i$  = Efecto verdadero del  $i$ ésimo tratamiento.

$\beta_j$  = Efecto verdadero del  $j$ ésimo bloque.

$\ell_{ij}$  = Error experimental.

#### Características del campo experimental

##### Campo experimental

Largo de campo experimental : 24 m

Ancho de campo experimental : 24 m

Largo de área neta experimental : 6 m

Ancho de área neta experimental : 6 m

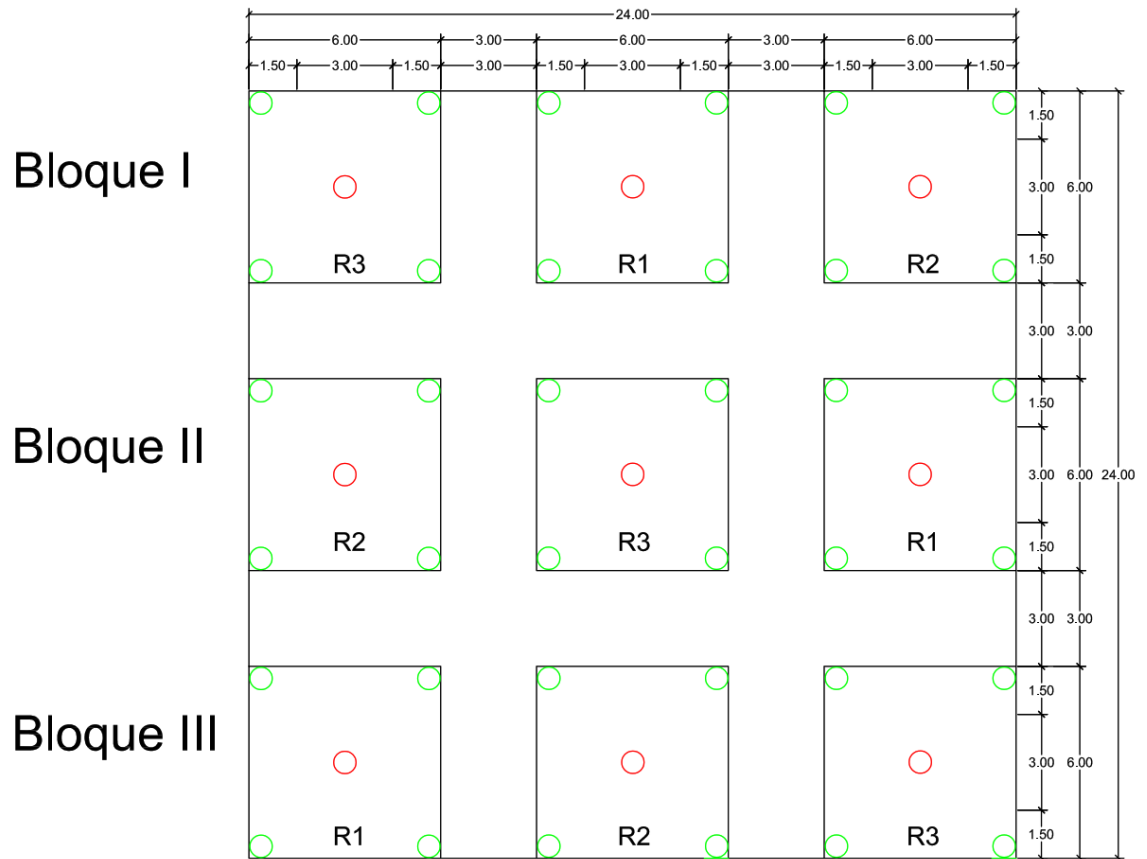
Ancho de camino	: 3 m
Área total del campo experimental	: 324 $m^2$
Área neta experimental	: 36 $m^2$
Área de caminos	: 252 $m^2$
Área neta experimental total del campo	: 576 $m^2$

**Bloque**

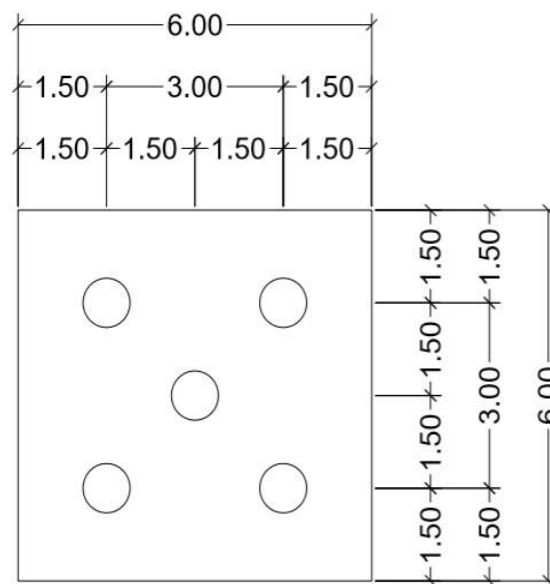
Numero de bloques	: 3
Largo del bloque	: 24
Ancho de bloques	: 6
Área de bloque	: 144 $m^2$

**Área neta experimental**

Distancia entre plantas	3 m x 3 m
Plantas por área neta experimental	5 plantas
Unidad por área neta experimental	1 planta



**Figura 1.** Croquis de camp experimental



**Figura 2.** Croquis de área neta experimental.

### 3.5.2. Datos a registrar

Una vez concluido el tiempo de interacción del biochar y suelo por 6 meses se realizaron los siguientes análisis en suelo y planta de cacao.

#### a) pH del suelo

Se determinó el pH del suelo mediante el método del potenciómetro, para lo cual se tomó 10 g de suelo y 10 ml de agua destilada, se hizo una pasta para luego tomar la lectura del pH.

#### b) Porcentaje de carbonatos

El porcentaje de carbonato se determinó por el método volumétrico. Se pesó 5 g de suelo al que se le añadió 50 ml de HCl 0.1 N luego se tomó 20 ml de alícuota de la solución filtrada y se realizó la titulación con el NaOH 0.1N.

#### c) Textura

La clase textural se determinó por el método de Bouyoucos, para el cual se colocó 50 g de suelo + 5 ml de NaOH 1N + 5 ml de oxalato de sodio saturado y agua destilada (2/3 del volumen del vaso) en el vaso del dispensador eléctrico para luego disgregar la solución por 15 minutos. Después se trasvaso la solución a una probeta y se enraso con el hidrómetro dentro a 1130 cc con agua destilada. Se realizó 2 lecturas de temperatura y densidad de la solución en un intervalo de dos horas con el hidrómetro y el termómetro.

#### d) Materia orgánica del suelo

La materia orgánica del suelo se determinó por el método de Walkley y Black modificado; primero se preparó la solución correctora después se pesó 1 gr de suelo al que se le añadió 10 ml de dicromato de potasio 1N +10 ml de ácido sulfúrico concentrado y dejó digerir por 30 minutos luego se trasvaso la solución a una fiola aforandola con agua destilada a 100 cc; de esta solución se tomó 20 ml, al que se le añadió 6 gotas del indicador difenilamina sulfúrica, para luego titular con el sulfato ferroso amoniacal 0.2N hasta el viraje color verde manzana.

**e) Capacidad de intercambio catiónico.**

La capacidad de intercambio catiónico se determinó mediante el método del acetato de amonio 1 N, pH 7.0. Primero se lavó 5 gr de suelo con 50 ml de agua destilada + 100 ml de acetato de amonio 1N pH 7.0 + 150 ml de alcohol etílico al 96%. El suelo lavado se incorporó al balón con 750 cc de agua destilada + 10 ml de hidróxido de sodio saturado y 2 g de parafina. En el equipo de destilación se colocó el balón y se destiló hasta que la solución destilada no tuvo viraje en las tiras de fenolfaleina. El alícuota producto de la destilación se recibió en la solución receptora (25 ml de ácido clorhídrico+ 5 gotas del indicador rojo de metilo y 100 ml de agua destilada) para luego titularla con el hidróxido de sodio 0.1N hasta el viraje color amarillo.

**f) Fosforo disponible**

Se determinó por el método de Watanabe y Olsen. Para ello se preparó una serie de soluciones estándar de 0, 1, 2 y 3 mg de P/L, luego se realizó la lectura de absorbancia en el espectrofotómetro para determinar la concentración de fosforo. Después se agitó la solución (2 g de suelo + 20 ml de bicarbonato de sodio 0.5 M pH 8.5 + 100 mg de carbón lavado Darco – 60) en el dispensador eléctrico por 30 minutos después se filtró las soluciones de las cuales se tomó 3 ml de alícuota +10 ml de molibdato II y se dejó en reposo por 10 minutos. Antes de hacer las lecturas en el espectrofotómetro de las muestras, se preparó la solución correctora (3ml de bicarbonato de sodio 0.5M + 10 ml de molibdato II) para la calibración del equipo.

**g) Concentración de cadmio en el suelo.**

La concentración de cadmio en el suelo determino por el método de absorción atómica por horno de grafito. Primero se pesó 5 g de suelo previamente tamizados y se colocó en unos frascos con sus identificaciones. Las muestras se enviaron al laboratorio de análisis de suelo de la UNAS.

Donde se determinó el cadmio total y disponible en el suelo en ppm.

#### **h) Concentración de cadmio en las hojas de cacao.**

Se determinó por el método de absorción atómica por horno de grafito. Primero se secó las hojas en una estufa después se trituro con el molinillo. Las muestras de hojas se colocaron en unas bolsas de papel con su respectiva identificación. Las muestras se enviaron al laboratorio de análisis de suelo de la UNAS donde para determinar la concentración de cadmio en ppm.

#### **i) Concentración de cadmio en granos de cacao.**

Se determinó por el método de absorción atómica por horno de grafito. De las mazorcas cosechadas se extrajo las almendras, luego se fermento por 7 días, después se secó los granos en una estufa. A los granos secos se le retiró la cascara con una pinza quedando solo el embrión para después triturarlos con el molinillo. Las muestras molidas se colocaron en una bolsa de papel con su respectiva identificación. Las muestras se enviaron al laboratorio de análisis de suelo de la UNAS donde se determinó la concentración de cadmio de los granos de cacao en ppm.

### **3.5.3. técnicas e instrumentos de recolección y procesamiento de la información.**

#### **3.5.3.1. Técnicas**

##### **a) Técnicas de investigación documental o bibliográfica**

###### *Fichaje*

Se utilizó para construir de manera sistemática la literatura citada según las normas del IICA\_CATIE.

###### *Análisis de contenido*

Se utilizó para construir el marco teórico, las mismas que fueron redactadas según las normas de IICA-CATIE.

## **b) Técnicas de campo**

### *Observación*

Fue la acción directa entre el investigador con el objeto de estudio, que permitió recolectar la información directamente del campo.

### *Evaluación*

Es el acto que permitió determinar las características físicas y químicas de las muestras de suelo tomadas del campo, de igual manera permitió cuantificar la concentración de cadmio en las almendras del cacao.

## **3.5.3.2. Instrumentos bibliográficos**

### **a) Fichas de registro o localización, siendo estas bibliográficas**

hemerográficas, se utilizó para anotar la información libros, Internet, revistas, periódicos, etc.

### **b) Las fichas de documentación e investigación**

fichas de transcripción, resumen y de comentario. Se utilizó para recopilar información de los libros, tesis, para construir el marco teórico.

hemerográficas, se utilizó para anotar la información libros,

## **3.5.3.3. Instrumentos de campo**

### **a) Libreta de campo**

Se utilizó para anotar los datos directamente del campo experimental, como fecha de recolección de las muestras, número de muestras de suelo, hoja y mazorcas, días de fermentado de las almendras.



### **3.6. MATERIALES Y EQUIPOS**

#### **a) Equipos**

Cámara fotográfica, laptop, balanza analítica y estufa de secado, potenciómetro, agitador eléctrico, termómetro, hidrómetro, cronometro y espectrofotómetro a una longitud de onda 660 nm.

#### **b) Materiales**

Barreno muestreador, balde de 20 L, bolsas de polietileno, machete, wincha, tijera de podar, cuaderno de campo, lápiz, lapiceros, botas, pipetas graduadas, micropipetas, fiola, balón de 750cc, vaso de precipitado, tubo de ensayo, probeta, papel toalla, embudos de vidrio papel filtro Whatman N° 40, Erlenmeyer, piceta, perlas de vidrio, gotero, soporte universal.

#### **c) Insumos**

- Biochar.
- Hidrogel.

#### **d) Reactivos**

Ácido clorhídrico 0,1 N, agua destilada, ácido nítrico al 65 %, ácido nítrico 0.1 N, ácido nítrico 3 M, acetato de amonio 1N a pH 7,0, alcohol etílico 96%, parafina en escamas, indicador rojo de metilo, indicador fenilfaleina al 11% en tiras, hidróxido de sodio saturado, hidróxido de sodio 0,1N, dicromato de potasio, ácido sulfúrico concentrado, ácido sulfúrico al 1/3, indicador difenilamina sulfúrica, sulfato ferroso amoniacal 0.2 N, solución tampón buffer con pH 4,01, tampón buffer con pH 6,86, heliantina o indicador anaranjado de metilo, hexametáfosfato de sodio 10%, hidróxido de sodio 1N+oxalato de sodio saturado, bicarbonato de sodio 0.5M a pH 8,5, carbón activo darco-60, molibdato I, molibdato II, ácido ascórbico.

### **3.7. CONDUCCION DE LA INVESTIGACION**

#### **a) Reconocimiento del lugar**

En el reconocimiento del lugar de ejecución se realizó con el fin de obtener algunos datos como: condiciones edafoclimáticas del lugar, edad de

las plantas y disponibilidad de terreno para la ejecución del trabajo de investigación.

#### **b) Acondicionamiento del biochar.**

El biochar se trituro a partículas más pequeñas luego se tamizo con un tamiz de 2 mm de diámetro, para uniformizar el tamaño de las partículas.

#### **c) Aplicación del biochar**

La aplicación del biochar se realizó de acuerdo a la recomendación del IBI (international biochar initiative) para arboles establecidos. El biochar fue aplicado en el área donde las raíces toman los nutrientes es decir en “la línea de goteo”, se esparció el biochar sobre el suelo, debido a que no se podía realizar zanjas porque las raíces del árbol de cacao son superficiales.

#### **d) Riego**

El riego se realizó cada 3 semanas en las áreas de suelo de las plantas estudiadas. Se aplicó hidrogel sobre la línea de goteo donde se aplicó el biochar para mantener la humedad del suelo y de ese modo facilitar la interacción biochar-suelo.

#### **e) Muestreo de suelo.**

El muestreo de suelo se realizó de las áreas donde se aplicó el biochar de las plantas en estudio con el barreno muestreador a una profundidad de 30 cm. De cada planta se extrajo 500 g de suelo. Las muestras se colocaron en unas bolsas previamente identificadas para evitar la confusión.

#### **f) Análisis en laboratorio de las muestras de suelo.**

El análisis físico y químico de las muestras de suelo se realizó en el laboratorio de suelos de la UNHEVAL. Las muestras de suelo una vez recolectadas de la parcela se secaron, tamizaron y se colocaron en un envase con su respectiva identificación. En las muestras de suelo se determinaron la

clase textural, % de materia orgánica, % de carbonatos, pH, capacidad de intercambio catiónico y fósforo disponible.

#### **g) Cosecha y Acondicionado de las mazorcas**

La cosecha de las mazorcas se realizó con una tijera de podar manual, luego se identificó para evitar confusiones. De cada planta se extrajo 5 mazorcas. Después se extrajeron los granos de la mazorca y se fermentó por 7 días. Pasado este tiempo se secó en la estufa a temperatura ambiente. Después del secado los granos de cacao se llevaron al laboratorio en bolsas de polietileno previamente identificadas. En el laboratorio se les quitó la cascara a los granos, después se molió 5 gr de cada muestra con el molinillo. Las muestras molidas se colocaron en bolsas de papel mantequilla y se enviaron para su análisis al laboratorio de suelos de la UNAS. La determinación de Cd se realizó mediante el método de digestión húmeda por espectrofotometría de absorción atómica por horno de grafito.

#### **h) Recolección y acondicionamiento de las hojas**

Se recolectaron 6 hojas por planta del tercio medio, luego se colocaron en bolsas previamente identificadas. Las hojas se secaron en una estufa por 4 días. Una vez secas se molieron con el molinillo luego se colocó la muestra en una bolsa de papel mantequilla. Las muestras se enviaron al laboratorio de suelos de la UNAS para su análisis por el método de absorción atómica por horno de grafito.

## IV. RESULTADOS

### 4.1. CONCENTRACIÓN DE Cd EN SUELO, HOJA Y GRANOS DEL CULTIVO DE CACAO.

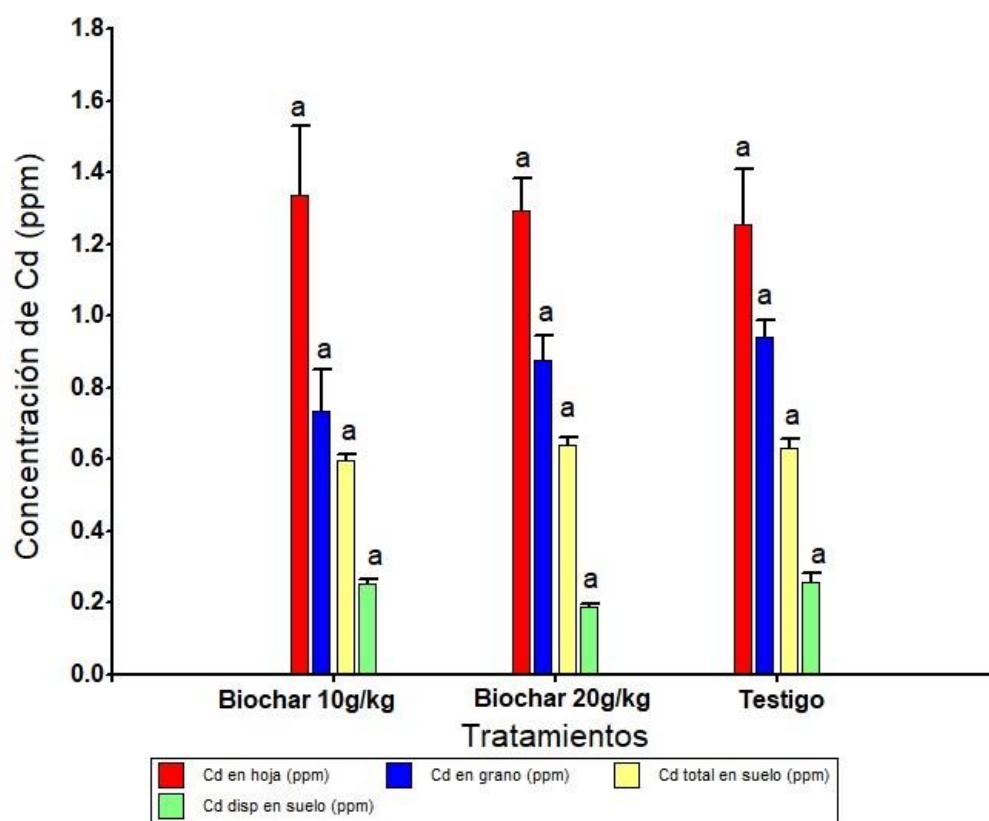
Los resultados del análisis de varianza (ANDEVA) para concentración de Cd en suelo y planta (hoja y grano) del cultivo de cacao indicaron falta de diferencia significativa entre tratamientos (**Cuadro 5**). El Cd total en el suelo fue estadísticamente igual para todos los tratamientos (p-valor=0,50), es decir no hubo diferencia significativa entre los tratamientos. Lo mismo se observó en la concentración de cadmio en los granos (p-valor=0,31) (**Cuadro 5**) si bien se ve que el cadmio en granos del testigo tuvo mayor promedio estas diferencias no fueron diferentes estadísticamente, lo mismo se vio para cadmio disponible en suelo, no hubo diferencia entre tratamientos (p valor=0,08) e igual para Cd en hojas (p-valor=0,95) (**Cuadro 5, Figura 3**).

**Cuadro 5:** Prueba LSD al 0,05 de nivel de significación para concentración de Cd en suelo, hoja y granos de cacao.

Variable	Tratamiento	Concentración de Cd (ppm)
Cd total	Testigo	0,632 a
	Biochar (10 g/kg)	0,597 a
	Biochar (20 g/kg)	0,638 a
Cd disponible	Testigo	0,258a
	Biochar (10 g/kg)	0,253a
	Biochar (20 g/kg)	0,258a
Cd en hoja	Testigo	1,255a
	Biochar (10 g/kg)	1,335a
	Biochar (20 g/kg)	1,292a
Cd en granos	Testigo	0,940a
	Biochar (10 g/kg)	0,735a
	Biochar (20 g/kg)	0,875a

**Cuadro 6:** Análisis de varianza resumido para contenido de Cd en suelo, hoja y grano de cacao.

Fuente de variación	g. l.	p-valor para Cd en grano, hoja y suelo			
		Cd en grano (ppm)	Cd en hoja (ppm)	Cd total en suelo (ppm)	Cd disponible en suelo (ppm)
Tratamiento (p-valor)	2	0,31ns	0,95ns	0,50ns	0,08ns
Repetición (p-valor)	2	0,47ns	0,95ns	0,74ns	0,51ns
Error	4				
Total	8				
<b>Coefficiente de variación y Diferencia mínima significativa para Cd en grano, hoja y suelo</b>					
C. V. (%)		17,15	24,83	6,86	12,53
DMS*		0,33	0,728	0,096	0,066



**Figura 3:** Concentración de Cd en hojas, Cd en granos, Cd total y disponible en suelo, del cultivo de cacao. Letras iguales significan falta de diferencia estadística a 0,05 de nivel de significación entre tratamientos dentro de cada variable. Las barras son el error estándar.

#### 4.2. EXPLICACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CADMIO EN GRANOS DE CACAO.

Para construir el modelo matemático que explica el contenido de Cd en granos, se verificó previamente los supuestos de la regresión lineal múltiple, que son normalidad, colinialidad y linealidad (**Ver anexos**). La selección del modelo se realizó con la Prueba se Stepwise, con lo cual quedó de la siguiente manera:

**Cuadro 7.** Análisis de regresión lineal

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
Cd en grano 9 (ppm)		0,70	0,60	0,03	-12,15	-11,37

Selección Stepwise

Máximo p-valor para entrar: 0,15

Máximo p-valor para retener: 0,15

Número original de regresoras: 6, regresoras retenidas en el modelo 2

**Cuadro 8.** Coeficientes de regresión y estadísticos asociados.

Coeficiente	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Const	2,22	0,51	0,97	3,48	4,32	0,005		
CaCO <sub>3</sub> (%)	-0,35	0,10	-0,59	-0,10	-3,47	0,013	13,03	2,80
Cd en hoja (ppm)	-0,47	0,25	-1,07	0,13	-1,90	0,050	4,63	2,80

El modelo es: Cd en grano= 2,22 – 0,35 CaCO<sub>3</sub> – 0,47 Cd en hoja;

R<sup>2</sup> Aj=0,60 –fórmula 1

### 4.3. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO Y LA CONCENTRACIÓN DE CADMIO EN LAS HOJAS Y GRANOS DE CACAO.

#### 4.3.1. Análisis de Componentes Principales (ACP)

Con los parámetros que se muestran en el (**Cuadro 9**) se realizó el análisis de componentes principales (ACP), donde el criterio de clasificación fue los tratamientos con biochar (**Figura 4**). A partir de este análisis estadístico se obtuvo el gráfico biplot (**Figura 4**). La variación de la información explicada por la componente 1 (CP1) y componente 2 (CP2) es del 73,2% y 26,8% respectivamente, acumulando el plano determinado por las dos primeras componentes (CP1 y CP2) el 100% de la información (**Figura 4**).

Del análisis del mismo se observa que el CP1 separa en distintos cuadrantes los parámetros CIC, materia seca en hojas, Cd en granos, Cd total en el suelo, Arena y Arcilla ponderados positivamente, mientras que CaCO<sub>3</sub>, materia orgánica, Cd en hoja, Cd disponible en suelo, pH, limo, P disponible fue ponderado de forma negativa (**Cuadro 5**). En este eje (CP1), el tratamiento Testigo se asocia de forma positiva con el Cd en grano y CIC. El tratamiento con Biochar 10 g/kg, sin embargo, presentó asociación negativa con Cd en hojas, CaCO<sub>3</sub> y limo.

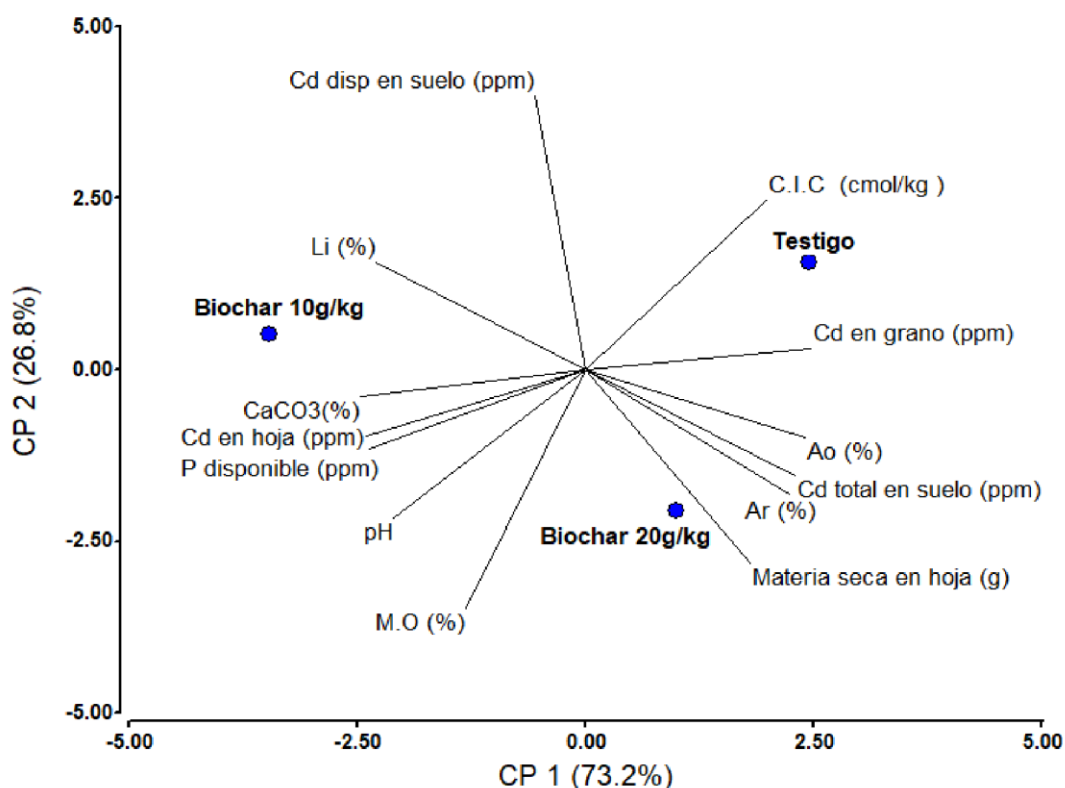
La segunda componente (CP2) separa en distintos cuadrantes los parámetros CaCO<sub>3</sub>, materia orgánica, materia seca en hoja, Cd en hoja, Cd total en el suelo, pH, arena, arcilla y P disponible que se ponderaron de forma negativa, mientras que la CIC, Cd en grano, Cd disponible en suelo y limo lo fue de forma positiva (**Cuadro 9**). En este eje (CP2), el tratamiento con Biochar a 10 g/kg de suelo estuvieron explicados por Cd en hoja, CaCO<sub>3</sub>, P disponible y limo. El tratamiento con Biochar con concentración de 20 g/kg de suelo tuvo menos Cd disponible en el suelo (**Figura 4**).

**Cuadro 9:** Valores de correlación entre los componentes principales y las variables medidas en el suelo, hoja y grano.

<b>Variables</b>	<b>Unidades</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>
CaCO <sub>3</sub>	%	-1,00	-0,10
Materia orgánica	%	-0,53	-0,85
CIC	cmol/kg	0,80	0,60
Materia seca en hoja	g	0,73	-0,69
Cd en hoja	ppm	-0,97	-0,24
Cd en grano	ppm	1,00	0,08
Cd total en suelo	ppm	0,93	-0,38
Cd disponible en suelo	ppm	-0,22	0,98
pH		-0,85	-0,53
Arena	%	0,97	-0,24



Arcilla	%	0,90	-0,44
Limo	%	-0,92	0,38
P disponible	ppm	-0,96	-0,28



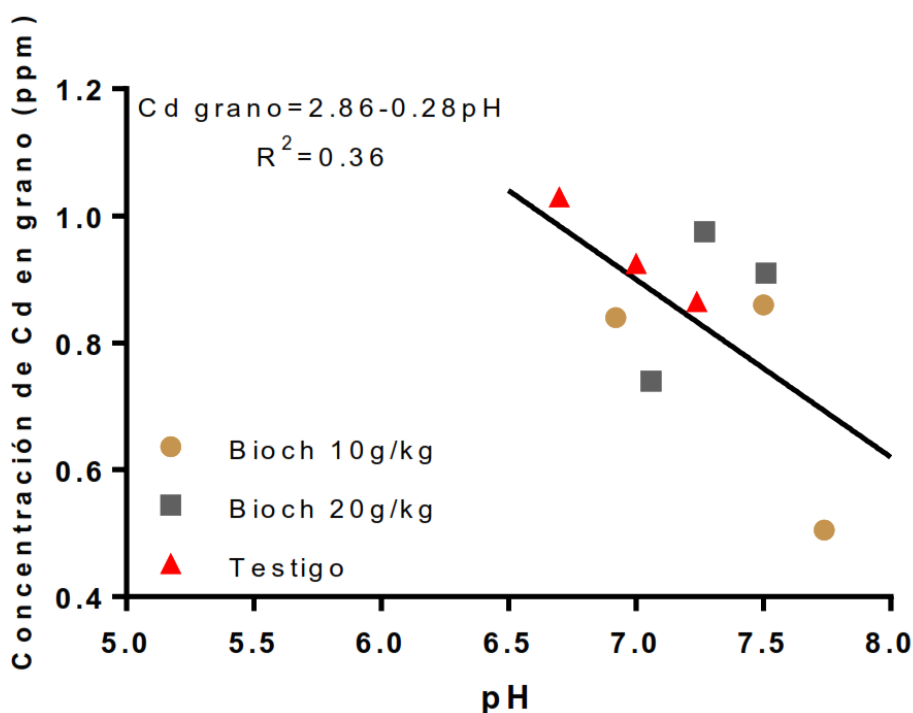
**Figura 4:** Análisis de componentes principales. Los vectores indican el peso relativo de cada variable sobre los ejes: Cd en grano, CIC, arena, arcilla, limo, Cd total en suelo, Materia seca en hojas, materia orgánica, pH, CaCO<sub>3</sub>, Cd en hoja, P disponible, Cd disponible en suelo. Los círculos son los tratamientos: Testigo, Biochar 10g/kg y Biochar 20 g/kg.

#### 4.3.2. Relación del contenido de Cd en granos y características del suelo

La concentración de Cd en granos del cultivo de cacao estuvo relacionada de forma negativa con algunas características del suelo. Los resultados mostrados en la **Figura 5** indican que el 36% del contenido de Cd en los granos estuvo explicado inversamente por el pH, es decir suelos con pH más bajos presentaron mayores contenidos de Cd en granos, a medida

que el pH del suelo subió a 7 los granos acumularon menos Cd. El tratamiento Testigo sin biochar presentó más bajos pH y las más altas concentraciones de Cd en granos (**Figura 5**).

La concentración de Cd en granos también guardó una relación negativa con la fracción arcilla+limo, lo cual indica que en suelos más finos (con mayor arcilla+limo) los granos exportaron menos Cd (**Figura 6**). La presencia de  $\text{CaCO}_3$  en el suelo estuvo relacionada de forma negativa con la concentración de Cd en granos (**Figura 7**). El Testigo presentó menos  $\text{CaCO}_3$ , con lo cual los más altos contenidos de Cd en los granos ocurrieron con este tratamiento, mientras que cuando se aplicó Biochar las concentraciones de Cd en los granos de cacao estuvieron entre 0,5 y 1,7 ppm. Vale aclarar que no se vieron relaciones estrechas entre el contenido de Cd disponible y Cd en grano, tampoco entre Cd en grano con el P disponible.



**Figura 5:** Relación entre Cd en grano y pH del suelo

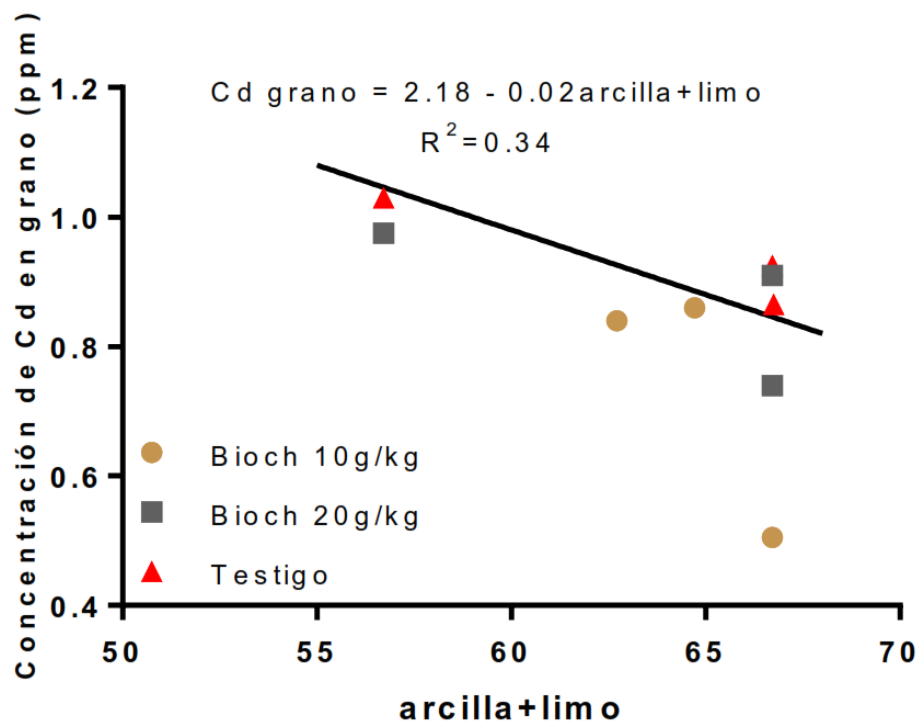


Figura 6: Relación entre Cd en grano y arcilla + limo

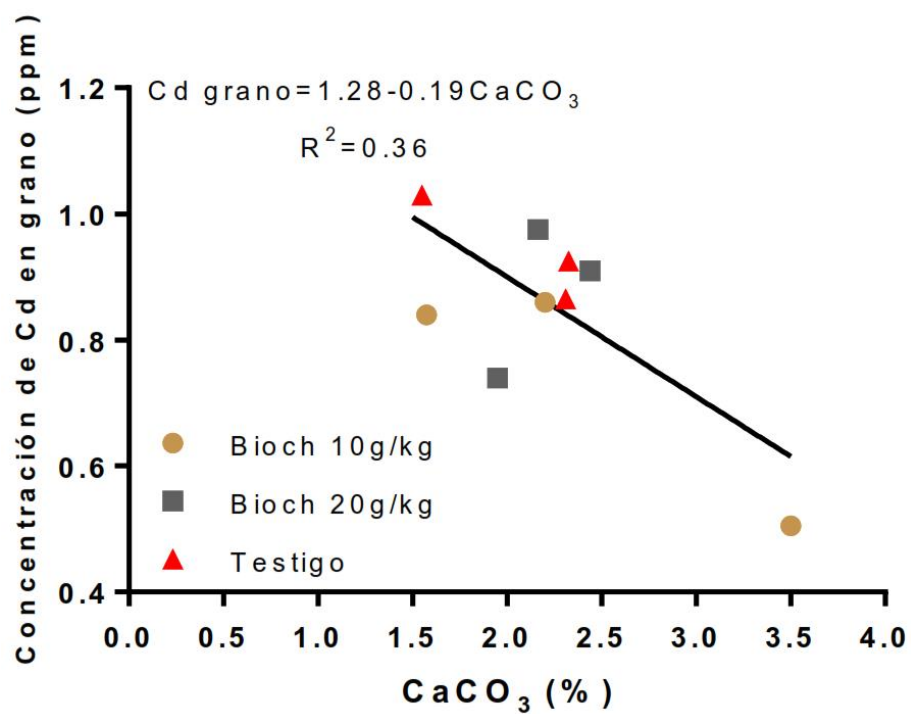
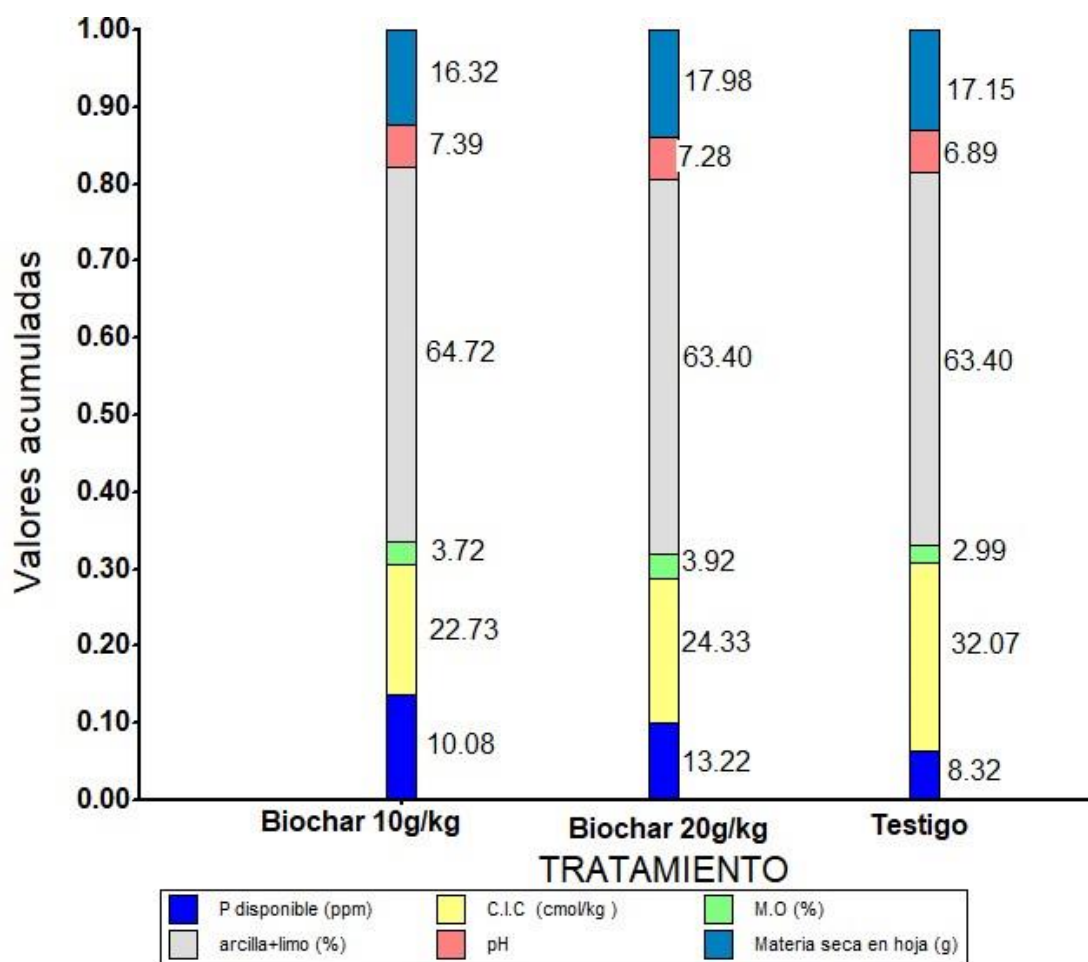


Figura 7: Relación entre Cd en grano y  $\text{CaCO}_3$ .

#### 4.3.3. Características del suelo de los tratamientos

El análisis de varianza para otras características del suelo de los distintos tratamientos indicó que no existe diferencia significativa entre los tratamientos. Sin embargo, en la **Figura 8** se muestra los valores promedios de P disponible, materia orgánica, CIC, arcilla + limo, materia seca en hojas y pH de los tratamientos. Si bien, el análisis estadístico indicó falta de diferencia estadística entre tratamientos, el Testigo presentó valores más bajos de P disponible y materia orgánica, cuyas dinámicas están relacionadas al agregado de enmiendas orgánicas como el biochar.



**Figura 8:** Valores promedios de fósforo disponible, materia orgánica, CIC, arcilla+limo, materia seca en hojas y pH en suelos de los tratamientos.

## V. DISCUSION

### 5.1. CONCENTRACIÓN DE CD EN SUELO Y GRANOS DEL CULTIVO DE CACAO.

En los resultados se observa que no hay diferencia significativa entre tratamientos respecto al contenido de Cd en granos, hojas y Cd total, Cd disponible en suelo debido al corto tiempo en que se realizó la investigación. En este caso el tiempo de interacción entre el biochar-suelo-planta de cacao fue de 6 meses. Bravo *et al.* (2019) reporto resultados a un año después de la aplicación del biocarbono reportando una disminución del cadmio en las almendras y suelo de un 97% y 99% aproximadamente con respecto al valor inicial.

Uchimiya *et al.* (2010); Cha *et al.* (2016); Qian *et al.* (2016) citado por Wang *et al.* (2020) mencionan que factores como el tiempo de residencia y el método de modificación del biochar influyen en la absorción de los metales pesados. Sik *et al.* (2016) indica que se necesita más información sobre las características químicas y físicas, junto con las aplicaciones específicas, del biochar. Además, los factores que influyen en la absorción de los metales pesados en diferentes tipos de suelos son complejos, ya que cada suelo es distinto en textura, clima, cantidad y calidad de materia orgánica. El biochar fue elaborado a partir de cascarilla de arroz lo que pudo haber afectado la movilidad del Cadmio en el suelo.

Según Lahori *et al.* (2017) el tipo de biochar y la tasa de aplicación del biochar son determinantes sobre el proceso de remediación de suelos contaminados. Si bien los niveles de aplicación de biochar, en este estudio fueron de 10g/kg (1%) y 20g/kg (2%) existen otros trabajos que reportan como

niveles óptimos un 5% de concentración de biochar (Anton y Herrero. 2020) por lo que las bajas concentraciones de biochar aplicados como inmovilizador habría afectado negativamente sobre la movilidad del cadmio en el suelo en este estudio.

## 5.2. EXPLICACIÓN DEL CONTENIDO DE CD EN GRANOS DE CACAO

En base a los resultados del ajuste del modelo usando las variables seleccionadas por la prueba de Stepwise. La forma lineal del modelo es:

$$Y = B_0 + wB_1 - xB_2 + \text{Error}$$

Usando los coeficientes de la salida del modelo, queda de la siguiente manera:

$$\text{Cd en grano} = 2,22 - 0,35\text{CaCO}_3 - 0,47 \text{ Cd en hoja};$$

$R^2 \text{ Aj} = 0,60$  –fórmula 1.

La interpretación para  $B_0$  será que, para cualquier planta de cacao del lote muestreado, la concentración de Cd en granos es de 2,22 ppm. Para  $B_1$ , por el aumento en una unidad (%) de  $\text{CaCO}_3$  en el suelo, la concentración de Cd en granos disminuirá en 0,35 unidades (ppm). Para  $B_2$  el aumento en 1 ppm de Cd en hojas, la concentración de Cd en granos se reduce en 0,47 ppm. Es decir, en suelos más calcareous con altos contenidos de  $\text{CaCO}_3$  es menor la contaminación de los granos con Cd. Por otro lado, la hoja sería el órgano más acumulador de Cd en el cultivo de cacao. Los destinos del Cd absorbido por la planta de cacao serían las hojas y los granos, pero principalmente las hojas y desde allí se producirían las exportaciones de Cd a los granos. Existen varios trabajos que muestran que las hojas de cacao son más acumuladoras de Cd.

Los resultados del modelo también indican que existe una fuerte correlación indirecta entre la Concentración de Cd en granos de cacao y las variables productoras  $\text{CaCO}_3$  en el suelo y concentración de Cd en hojas, esto se visualiza en el coeficiente  $R^2 = 0,70$ . Como el coeficiente  $R^2 \text{ Aj} = 60\%$ , podemos afirmar que el 60% de la variabilidad del Contenido de Cd en granos (Y) se explica a través de la magnitud de  $\text{CaCO}_3$  en el suelo y Cd en hojas.

Considerando el modelo matemático (fórmula 1), conociendo el valor de  $\text{CaCO}_3$  de un suelo y el contenido de Cd en hojas del cultivo de cacao se puede predecir la concentración de Cd en granos del mismo cultivo, utilizando valores de análisis de suelo  $\text{CaCO}_3$  y concentración de Cd en hojas.

Chávez (2020) señala en un estudio realizado sobre la Correlación entre el cadmio con el Ca, Mg y Zn, en almendras de cacao con la aplicación de tres fuentes orgánicas sugiere incrementar el contenido del Ca, Mg y Zn en el suelo para limitar la absorción del cadmio disponible del suelo por la planta reduciendo su presencia en los granos del cacao. Gonzales *et al* (2010) señala que la alta movilidad del  $\text{Cd}^{2+}$  en el suelo se atribuye a la acidez del suelo. Para valores de pH menores de 6 el  $\text{Cd}^{2+}$  se adsorbe débilmente en la materia orgánica, arcillas y óxidos, mientras que para valores de pH mayores de 7 el  $\text{Cd}^{2+}$  puede coprecipitar con  $\text{CaCO}_3$ , o precipitar como  $\text{CdCO}_3$ . Jordán *et al.* (2009), citado por Gonzales *et al.* (2010) indica que el cadmio en el suelo se encuentra asociado a los carbonatos entre 19-24% y a otras fracciones entre 70- 79 %.

### **5.3. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO Y EL CONTENIDO DE CD EN LAS HOJAS Y GRANOS DE CACAO.**

#### **5.3.1. Análisis de componentes Principales (ACP).**

El ACP indicó que el tratamiento testigo estuvo asociado de forma positiva con el cadmio en grano y CIC (Figura 4). El tratamiento Testigo tuvo valores más altos de CIC y más Cd en granos. Estos resultados son razonables porque en este tratamiento no se agregó Biochar, con lo cual las plantas siguieron exportando Cd a los granos. Zhang *et al.* (2019) indica que las plantas en condiciones mal nutridas pueden exudar un tipo de ácido orgánico para movilizar más elementos en el suelo, incluyendo metales pesados, con lo cual las plantas absorben más cadmio durante el ciclo del cultivo.

Tan *et al.* (2015). manifiesta que el biocarbon o biochar tiene la capacidad para quelar metales pesados en el suelo. Balta (2019). La

precipitación y las reacciones redox también influyen en la biodisponibilidad de estos elementos en el suelo disminuyendo así la absorción de Cd por las raíces y su posterior ingreso hacia la parte aérea. Silveria *et al.* 2003 citado por Lactas (2016) menciona que la adsorción de los metales a las partículas del suelo reduce la concentración de metales en la solución suelo.

Así que un suelo con alta CIC tiene más sitios de intercambio en la fracción coloidal del suelo los que estarán disponibles para una mayor adsorción y posible inmovilización de los metales. Y es así que la adición de Biochar en el suelo aumenta la capacidad de intercambio catiónico por su alta superficie específica lo cual reduce la disponibilidad de metales en el suelo (Lehmann y Joseph, 2009) de paso evita la pérdida de nutrientes por lixiviación.

El tratamiento con biochar a concentración de 10g/kg, estuvo asociado de forma negativa con el Cd en hojas, fósforo disponible, CaCO<sub>3</sub> y limo (figura 6) Es decir, el tratamiento Biochar 10 g/kg tuvo menos Cd en hojas. Esto se puede atribuir al efecto inmovilizador quelatante del Cd por el biochar. Cuando se agregó Biochar, el Cd se hizo menos disponible en el suelo, entonces las plantas dejaron de absorber y acumular Cd en las hojas. Lo mismo manifiesta Khan *et al* (2017). En su estudio sobre la eficacia del biocarbón de estiércol de vaca en la inmovilización de Cd en el suelo, indican que el biochar se compone de una superficie mesoporosa con alto contenido de C y O. Estos mecanismos combinados con la naturaleza alcalina del biochar están involucrados en la inmovilización y reducción de la acumulación de Cd en las hojas.

Laird *et al* (2017) citado por Balta (2019) señala que el biochar altera la disponibilidad de fósforo en los suelos al reducir la lixiviación de fósforo a través de la adsorción y sorción. Balta. (2019) Señala que el tratamiento con biochar a una dosis de 1.0, 2.5 y 5.0 gr/kg de arena con valores promedios de 0.049, 0.046 y 0.41 en cultivo de tomate bajo invernadero para disminuir Cd en el suelo registro una mayor absorción de fósforo diferenciándose estadísticamente del testigo lo que nos indica que a mayores dosis de biochar



la asimilación de fósforo disminuye. Del mismo modo Sik *et al.* (2016) mencionan que la aplicación de biochar mejora la absorción de fósforo por las plantas. Lo cual habría ocurrido con el tratamiento de biochar 10 g/kg en este estudio.

El tratamiento con biochar con concentración de 20 g/kg de suelo tuvo una asociación negativa con el cadmio disponible en el suelo (Figura 6). Esto también es razonable porque el biochar ejerce inmovilidad sobre el Cd disponible en el suelo debido a su acción quelatante (Tan *et al.* 2015). Bravo *et al.* 2019 señala en su trabajo que el contenido de cadmio disponible en el suelo inicial y final, exhibió concentraciones consideradas como bajas al compararla con el valor crítico ( $2 \text{ mg kg}^{-1}$ ) con una reducción del 99% con la aplicación del biocarbono. Asimismo, Khan *et al.* (2017) señala que la aplicación de biocarbono en suelo contaminado con Cd tiene el potencial de disminuir el contenido de Cd eficazmente en el suelo. Beesley y Marmiroli

(2011) citado por Sik *et al.* (2016) demostraron que el biocarbono a través del proceso de sorción superficial redujo las concentraciones en lixiviados de Cd y Zn en el suelo de 300 y 45 veces respectivamente. Todos estos estudios nos permitieron comprender porque el cadmio disponible en el suelo estuvo relacionado negativamente con el tratamiento con biochar 20 g/kg, aunque habría ocurrido evidencias más claras si se hubiera dejado más tiempo de interacción entre el Biochar- suelo contaminado – cultivo de cacao.

### **5.3.2. Relación del contenido de Cd en granos y características del suelo.**

El contenido de Cd en granos del cultivo de cacao estuvo relacionado de forma negativa con el pH. Suelos con pH más bajos tuvieron más Cd en granos (Figura 5). Esto puede atribuirse a que el Cd como metal pesado se hace disponible con mayor facilidad en situaciones de pH ácidos. Acevedo 2005 citado por Florida *et al.* (2018<sup>a</sup>) indica que conforme el pH aumenta la contaminación disminuye y a la vez las plantas absorben menos elementos contaminantes.

Uchimiya *et al.* (2010) citado por Sik *et al.* (2016) ha demostrado que la adición de biocarbón aumenta el pH, mejorando así la inmovilización de metales pesados [por ejemplo, Cd (II), Cu (II), Ni(II) y Pb(I)]. Joseph y Taylor (2014; 2012) citado por Sik *et al.* (2016) mencionan que el biochar producido en condiciones anóxicas son ricos en silicatos y óxidos minerales que pueden disminuir la disponibilidad de metales pesados catiónicos como el  $\text{Cd}^{+2}$  al aumentar el pH del suelo y la capacidad de intercambio de cationes. Ross, 1994 citado por Llactas (2016) indica que generalmente los metales quedan retenidos en el suelo a pH básicos mientras que a pH ácidos los metales están más solubles siendo por lo tanto mayor su disponibilidad para las plantas. Lo cual habría ocurrido en este estudio.

El Cd en granos también fue más alto cuando el suelo tuvo menos arcilla+limo (Figura 5). Es decir, suelos más arenosos permitieron que las plantas exporten más Cd a los granos, esto es atribuible a la baja capacidad de adsorción del Cd en suelos arenosos, con lo cual se hace disponible para ser absorbido por las plantas y ser exportados a los granos de cacao. De igual manera Ines (2011) menciona que los suelos arenosos carecen de capacidad de fijación de los metales pesados, los cuales pasan rápidamente a la solución del suelo, subsuelo y pueden contaminar las aguas freáticas, a diferencia de los suelos arcillosos que tienden a adsorber los metales pesados quedando retenidos en el complejo de cambio.

El contenido de Cd en granos de cacao fue mayor cuando en el suelo hubo menos  $\text{CaCO}_3$  (Figura 5). Esto es razonable, ya que, en situaciones menos calcáreas, el pH es más bajo, es decir más ácido, con lo cual se facilita la disponibilidad de Cd para las plantas. Herrejon (2005) indica que el  $\text{CaCO}_3$  es un amortiguador del pH. Lopez y Grau (2005) citado por Espinosa (2019) señala que la presencia de carbonatos garantiza el mantenimiento de altos valores de pH, los cuales tienden a precipitar los metales pesados como el Cd presentando así una marcada tendencia a quedar adsorbido por los carbonatos y es así que la precipitación de carbonatos de cadmio predomina cuando hay elevadas concentraciones de cadmio. Acevedo *et al.*, 2005 citado

por Florida *et al* (2018ab) menciona que la absorción de Cd<sup>+2</sup> por la planta se ve favorecido a pH de 5-6 (suelos ácidos). Así mismo Jordan (2005) indica que los suelos ácidos es decir con pH bajos, tienen baja concentración de carbonato.

Si bien, se realizaron tratamientos con Biochar, los granos de cacao tuvieron todavía valores entre 0.5 y 1.7 ppm (Figura 6). Los cuales están por encima del valor límite permisible por la Unión Europea que es de 0.5 ppm. Estos resultados son atribuibles al poco tiempo de interacción entre el biochar y el suelo contaminado con Cd, porque el tiempo de ensayo fue solo de 6 meses. Sik *et al.* (2016) menciona que, a pesar de las investigaciones recientes, los beneficios ambientales y económicos del biocarbón aún no se caracterizan plenamente. En experimentos a corto plazo (meses a algunos años), con el biochar no se ha especificado la durabilidad de los efectos que tiene su aplicación. Particularmente en relación con cultivos específicos y tipos de suelo, es fundamental conocer el método de producción y la tasa de aplicación del biochar dependiendo del propósito.

Por lo tanto, Tang *et al.* (2013); Oliveira *et al.* (2017) citado por Wang *et al.* (2020) indican que la selección de biocarbón es un factor crucial para la remediación efectiva de contaminantes específicos, y se necesita más investigación antes de la aplicación a gran escala de biocarbón para la remediación de HM en los suelos. Así mismo Subero (2016) menciona que en la práctica agrícola es de suma importancia asegurar una correcta incorporación del biochar en el suelo. Debido a que el tamaño de partícula del biochar es variable por lo que su mezcla con el suelo puede ser poco homogénea.

### **5.3.3. Características del suelo en los tratamientos**

Si bien, el análisis estadístico indicó falta de diferencia estadística entre tratamientos, el Testigo presentó valores más bajos de P disponible y materia orgánica, cuyas dinámicas están relacionadas al agregado de enmiendas orgánicas como el biochar (Figura 8). Estos resultados son atribuibles a que

el biochar actúa como materia orgánica, algunos autores han indicado que su uso puede reemplazar a la materia orgánica, que puede mejorar los contenidos de materia orgánica, de lo cual el fósforo también se puede hacer disponible en mayor proporción.

Investigaciones recientes han demostrado que la aplicación de biocarbón a los suelos puede mejorar la fertilidad del suelo (Lehmann y Joseph, 2009). Glaser *et al.* (2002) citado por Sik *et al.* (2016) señala que el biochar fue responsable del alto contenido de materia orgánica y la mayor fertilidad de los suelos antropogénicos (terra preta) que se encuentran en el Amazonas central. Subero (2016) afirma que la adición de biochar ejerce una gran influencia sobre la disponibilidad de nutrientes en el suelo, aumentando la disponibilidad de P, K, Ca, Mg y Cu.

Asimismo, Guzman (2019) menciona que la materia orgánica puede adsorber fuertemente a algunos metales, gracias a su capacidad de intercambio catiónico como por su capacidad quelante, quedando de esa manera los metales pesados en posición no disponible para las plantas. Sik *et al.* (2016) menciona que el P aplicado como fertilizante para los cultivos sólo el 10-20% es aprovechado durante el primer año, debido a que la mayor parte es rápidamente fijado o precipitado a formas de baja solubilidad.

Sin embargo la aplicación de biochar aumenta la retención de P y la disponibilidad de P y K en los suelos; el aumento está positivamente relacionado con la tasa de aplicación del biocarbón. Hass *et al.* (2012; 2014).citado por Sik *et al.* (2016) afirma que hay dos posibles explicaciones para el aumento del contenido de P disponible en el suelo después de la aplicación de biochar: (1) el alto contenido de P en el biocarbón aplicado y (2) el aumento de la CIC, y como resultado de la aplicación de biochar aumentaría la disponibilidad de P en el suelo.

## CONCLUSIONES

- a) Los niveles de Biochar de 10 g/kg y 20g/kg no existieron diferencias significativas respecto al contenido de cadmio total y disponible en el suelo, ni en el contenido de Cd en los granos y hojas, sin embargo, el tratamiento con 10 gr / kg el contenido de fósforo disponible,  $\text{CaCO}_3$  y Cd en las hojas, fue bajo. El tratamiento con biochar de 20 gr/kg tuvo bajo contenido de Cd disponible en el suelo. La absorción de cadmio en hojas y granos fue alta en el testigo, debido a que el suelo no fue tratado con el biochar. El Cd en los granos de cacao aun con la aplicación del biochar tuvieron valores entre 0,5 y 1,7 ppm. Los cuales están por encima del valor límite permisible por la Unión Europea (0,5 ppm).
- b) El contenido de Cd en los granos aumenta conforme el pH del suelo disminuye, es decir, cuando el suelo presenta pH ácido el Cadmio se hace disponible en el suelo. Asimismo, los suelos con bajo contenido de arcilla y limo, tienden hacer más disponible el Cd en la solución del suelo permitiendo de esa manera el incremento del Cadmio en los granos. Respecto al contenido de materia orgánica y fósforo disponible el testigo presentó valores inferiores a los tratamientos en los que se aplicó el biochar.
- c) Se determinó que la fuente principal de Cd en los granos son las hojas y que el  $\text{CaCO}_3$  predispone la concentración de Cd en los granos de cacao.

## RECOMENDACIONES

A los investigadores de la región de Huánuco y estudiantes de la Escuela Profesional de Ingeniería Agronómica de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad nacional Hermilio valdizán:

- a) Realizar trabajos de investigación sobre técnicas de remediación de suelos para establecer una metodología clara respecto al manejo de Cadmio en los diferentes tipos de suelos destinados al cultivo de cacao.
- b) Realizar ensayos en maceteros, bajo condiciones de invernadero por los desafíos que trae la aplicación de Biochar en campo definitivo y la complejidad de la interacción suelo – biochar - medio ambiente y las distintas condiciones de nutrición de las plantas. Asimismo, también para conocer la durabilidad de los efectos y la dosis de aplicación del mismo en el suelo.
- c) Para tener efectos positivos en el proceso de remediación con la aplicación del biochar, la interacción suelo – biochar - metal pesado debe ser mayor a un año, es decir, el muestreo de suelo después de la aplicación del biochar se debe realizar a intervalos de 1 año.

## LITERATURA CITADA

- Acosta, S. y Pozo, P. 2013. Determinación del cadmio en la almendra de cacao (*Theobroma cacao* L) de cinco fincas ubicadas en la vía santo domingo – Esmeraldas, Mediante espectrofotometría de absorción atómica con horno de gráfico. (En línea). Consultado 4 de oct. 2018. Disponible en <http://infoanalitica-puce.edu.ec/index.php/infoanalitica/articulo/view/43/29>
- Alonso, M. *et al.* 2013. Efecto del Biocarbon en las propiedades físicas de diferentes sustratos orgánicos. (En línea). Consultado el 28 de oct. 2018. Disponible en <http://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/articulo/view/29>
- Andres, J. 2018. Técnicas de remediación de metales pesados con potencial aplicación en el cultivo de cacao. (En línea). Consultado en línea el 24 de nov. 2018. Disponible en <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/viewFile/2027/1835>
- Anton - Herrero *et al.* 2020. Impact of New Micro Carbon Technology Based Fertilizers on Growth, Nutrient Efficiency and Root Cell Morphology of *Capsicum annuum* L. (En línea). Consultado en línea el 24 de nov. 2018. Disponible en <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/8/1165>
- Arevalo, E. 2016. Metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres regiones del Perú. (En línea). Consultado el 24 de nov. 2018. Disponible en <http://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/eau/article/view/747/768>.
- Arvelo. M, Gonzalez. D. Maroto. S. Delgado. T. Montoya. P. 2017. Manual Técnico Del Cultivo Del Cacao Buenas Prácticas para America Latina. Consultado el 16 de oct. 2020. (En línea). Disponible en: <http://repositorio.iica.int/bitstream/11324/6181/1/BVE17089191e.pdf>

- Avendaño. C. Villarreal. J. Campos. E. 2011. Diagnóstico del cacao en México. (En línea). Consultado el 15 de oct. 2020. Disponible en: [http://fec-chiapas.com.mx/sistema/biblioteca\\_digital/diagnostico-del-cacao-en-mexico.pdf](http://fec-chiapas.com.mx/sistema/biblioteca_digital/diagnostico-del-cacao-en-mexico.pdf)
- Balta. R. 2019. el carbón activado y el biocarbon en la asimilación de cadmio por el tomate (*Solanum lycopersicum* L) bajo el invernadero. Tesis. (En línea). Consultado el 22 de febr. 2020. Disponible en: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3874>
- Baron L. 2016. Perfil dl riesgo de inocuidad asociado a la presencia de los residuos de cadmio en cacao. (*Theobroma cacao* L). (En línea). Consultado 17 oct. 2018. Disponible en <http://repository.lasalle.edu.co/handle/10185/21262>
- Batista. L. 2009. Guía técnica - El cultivo de cacao. (En línea). Consultado en el 16 de oct. 2020. Disponible en: [https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as\\_sdt=0,5&q=tipo+de+suelos+para+el+cultivo+de+cacao](https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0,5&q=tipo+de+suelos+para+el+cultivo+de+cacao)
- Bravo.C *et al.* 2019. Evaluación del uso de un biocarbono sobre la absorción de cadmio del suelo y la productividad del cultivo de cacao (*Theobroma cacao*.L) en la Amazonia Ecuatoriana. (En línea) Consultado el 24 de jul. de 2020. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/341733470\\_Evaluacion\\_d\\_el\\_uso\\_de\\_un\\_biocarbono\\_sobre\\_la\\_asorcion\\_de\\_cadmio\\_del\\_suelo\\_y\\_la\\_productividad\\_del\\_cultivo\\_de\\_cacao\\_Theobroma\\_cacao\\_L\\_en\\_la\\_Amazonia\\_ecuatoriana](https://www.researchgate.net/publication/341733470_Evaluacion_d_el_uso_de_un_biocarbono_sobre_la_asorcion_de_cadmio_del_suelo_y_la_productividad_del_cultivo_de_cacao_Theobroma_cacao_L_en_la_Amazonia_ecuatoriana)
- Cardenas, A. 2012. Presencia de cadmio en algunas parcelas de cacao organico en la cooperativa agraria industrial Naranjillo – Tingo María – Peru. (En línea). Consultado el 2 sep. 2018. Disponible en <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/153>



- Cerron. G. 2012. Asistencia técnica dirigida en manejo del cultivo de cacao. (En línea). Consultado el 16 de oct. 2020. Disponible en: [https://www.agrobanco.com.pe/wp-content/uploads/2017/07/010-cacao\\_CULTIVOS\\_.pdf](https://www.agrobanco.com.pe/wp-content/uploads/2017/07/010-cacao_CULTIVOS_.pdf)
- Cely. P. 2016. Evaluación del uso de residuos orgánicos para la producción de Biochar y su aplicación como enmienda orgánica. (En línea) Consultado en línea el 4 de nov. 2018. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=123535>.
- Codex Alimentarius Commission y Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2018. Petición de observaciones en el trámite 3 sobre el anteproyecto de niveles máximos para el cadmio en el chocolate y productos derivados del cacao. 12-16 March 2018. (En línea). Consultado el 20 de nov. 2018. Disponible en [http://www.fao.org/faowhocodexalimentarius/shproxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FMeetings%252FCX-735-12%252FCRDs%252Fcf12\\_CRD31x.pdf](http://www.fao.org/faowhocodexalimentarius/shproxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FMeetings%252FCX-735-12%252FCRDs%252Fcf12_CRD31x.pdf).
- Coronel, E. 2018. Determinación de metales pesados plomo (Pb) y cadmio (Cd) en hortalizas de consumo directo producidas orgánicamente. (En línea). Consultado el 4 de oct. 2018. Disponible en <http://www.dspace.uce.edu.ec:8080/handle/25000/14566>
- Cordero, J. 2015. Fitorremediación in situ para la recuperación de suelos contaminados por metales pesados (plomo y cadmio) y evaluación de selenio en la finca Furatena alta en el municipio de Utiaca (Cundinamarca). (En línea). Consultado el 4 de oct. 2018. Disponible en <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7958/Fitorremediacion%20in%20situ%20para%20la%20remocion%20de%20metales%20pesados%20%28plomo%20y%20cadmio%29%20y%20evaluacion%20de%20sel.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Cueto M. 2016. Potencial de producción de biochar a partir de residuos de la industria papelera, de lodos de E.D.A.R., de residuos sólidos urbanos y de residuos ganaderos: estudio de la fijación de carbono. (En línea) Consultado el 20 de oct. 2018. Disponible en: <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/20520>.

Chávez.J. 2020. Efecto de fuentes y tres niveles de materia orgánica y la reducción de la absorción de cadmio en almendras de cacao Leoncio Prado. Tesis. (En línea). Consultado 24 de agost. 2020. Disponible en:[http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/1711/TSJ\\_JCM\\_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/1711/TSJ_JCM_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Diario Oficial de la Unión Europea. 2018. Reglamento (UE) N° 488/2014 de la comisión que modifica el Reglamento (CE) N° 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de cadmio en los productos alimenticios. (En línea). Consultado el 20 de nov. 2018. Disponible en <https://eurlex.europa.eu/legalcontent/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0488&from=ES>

Díaz, C. 2017. Uso de acícula de pino (*Pino patula*) como enmienda orgánica de suelo negro andino (Andosol). (En línea). Consultado el 28 de sep. 2018. Disponible en <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/6828/1/12800.pdf>

DIGESA (Dirección general de salud ambiental e inocuidad alimentaria), 2017. Plan de monitoreo para determinar presencia de metales pesados y peligros microbiológicos en alimentos industrializados derivados del cacao. 2017- 2018. (En línea). Consultado en 29 de oct. 2018. Disponible en [http://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/PERUDIGESAPLAN\\_MONITOREO\\_DE\\_CADMIO\\_EN\\_ALIMENTOS\\_DERIVADOS\\_DE\\_EL\\_CACAO\\_2017-2018.pdf](http://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/PERUDIGESAPLAN_MONITOREO_DE_CADMIO_EN_ALIMENTOS_DERIVADOS_DE_EL_CACAO_2017-2018.pdf)

- Enriquez. G. 1987. Manual del cacao para agricultores. Consultado el 16 de oct. 2020. (En línea). Disponible en [https://books.google.com.pe/books?id=HN\\_ISlbgzXsC&printsec=frontcover&dq=cultivo+de+cacao&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwj0eGhq77sAhVWHbkGHUgWDV4k4FBD0ATAFegQIBRAC#v=onepage&q=cultivo%20de%20cacao&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=HN_ISlbgzXsC&printsec=frontcover&dq=cultivo+de+cacao&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwj0eGhq77sAhVWHbkGHUgWDV4k4FBD0ATAFegQIBRAC#v=onepage&q=cultivo%20de%20cacao&f=false).
- Enríquez. E. 1985. Curso sobre el cultivo de cacao. (En línea). Consultado el 16 oct. De 2020. Disponible en <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=eZgOAQAIAAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=cultivo+de+cacao+en+colombia&ots=IroNX5Np7L&sig=gpWy4PljvG9JzxXwLcNrB7Ahp8#v=onepage&q=cultivo%20de%20cacao%20en%20colombia&f=false>
- Enríquez. G. y Paredes. A. 1992. El cultivo de cacao. (En línea). Consultado el 16 de oct. 2020. Disponible en [https://books.google.com.pe/books?id=3JRfK0v\\_pYMC&pg=PA16&dq=cultivo+de+cacao&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwi2gsXcjL3sAhVOH7kGHdHfDy4Q6AEwCHoEAAQAg#v=onepage&q=cultivo%20de%20cacao&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=3JRfK0v_pYMC&pg=PA16&dq=cultivo+de+cacao&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwi2gsXcjL3sAhVOH7kGHdHfDy4Q6AEwCHoEAAQAg#v=onepage&q=cultivo%20de%20cacao&f=false)
- Espinosa. B. 2019. Efecto del compost, dolomita y magnocal en el contenido de cadmio del suelo y los granos de cacao (*Theobroma cacao* L) del clon CCN-51. Tesis. (En línea). Consultado el 12 de agost. 2020. Disponible en [http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/1492/BJEP\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/1492/BJEP_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Florida. N. *et al.* 2018a. El pH y la absorción de cadmio en almendras de cacao organico (*Theobroma cacao* L) en Leoncio prado Huanuco, Perú. (en línea). Consultado el 12 de agost.. 2020. Disponible en <http://revistas.iiap.gob.pe/index.php/fofiaamazonica/article/view/438>

- Florida. N. *et al.* 2018b.comportamiento del cadmio y otros indicadores en suelo y almendra de cacao (*Theobroma cacao L.*), bajo aplicación de compost y NPK. (En línea). Consultado el 12 de agost. 2020. Disponible en <http://revistas.iiap.gob.pe/index.php/foliaamazonica/article/view/461>
- Gilces. M. 2014. Efectos de la aplicación de biochar y cenizas en las propiedades del suelo. (En línea). Consultado el 20 de oct. 2018. Disponible en <file:///H:/tesis/IMPRIMIR/BIOCHAR/EFEECTO%20DE%20BIOCHAR%20EN%20SUELO%20.pdf>
- Gonzales. C. *et al* 2010. Concentración de cadmio en partículas de diferentes tamaños de un suelo de la cuenca del lago de valencia. (En línea). Consultado 24 de agost. 2020. Disponible en <https://pdfs.semanticscholar.org/11a7/98a05df395629e64bbe7cd1d1b63ddc15de2.pdf>
- González, C. 2016. Evaluación de la concentración mínima aceptable e identificación de metales pesados presentes en el grano de cacao del Ecuador. (En línea). Consultado el 23 de nov. 2018. Disponible en <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/7789>
- Guerra, P. 2015. Producción y caracterización de biochar a partir de la biomasa residual de sistemas agroforestales y de agricultura convencional en la amazonia peruana. (En línea). Consultado el 4 de oct. 2018. Disponible en <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/1895>.
- Guzman. J. 2019. Efecto De La Materia Orgánica En La Reducción Del Cadmio En El Suelo Y En Plantones De Cacao (*Theobroma Cacao L.*) En Vivero". (En línea). Consultado el 01 de sep. 2020. Disponible en <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1574>.

- Herrejon. M. 2005. Cinética e isotermas de adsorción de plomo Pb II en suelo de monterrey. (En línea). Consultado 01 de sept. 2020. Disponible en [http://eprints.uanl.mx/10396/1/41\\_Cinetica.pdf](http://eprints.uanl.mx/10396/1/41_Cinetica.pdf)
- Hernández, A. *et al* 2017. Acumulación de cadmio en seis genotipos de cacao utilizados como patrón. (En línea). Consultado en línea: el 26 de nov. 2018. Disponible en [https://www.icoline.ipleiria.pt/bitstream/10400.8/3478/1/TESE-%20Ricardo\\_final%2029-062018ENTREGAR.pdf](https://www.icoline.ipleiria.pt/bitstream/10400.8/3478/1/TESE-%20Ricardo_final%2029-062018ENTREGAR.pdf)
- Hernández, A *et al*. 2017. Metales pesados en suelo, hojas y granos de zonas cacaoteras del Perú. (En línea). Consultado el 21 de nov. 2018. Disponible en <https://www.icco.org/about-us/international-cocoaagreements/catview/68-icco-workshops-and-seminars/352-international-cocoa-research-symposium-lima-peru-2017/438proceedings-of-theinternational-symposium-on-cocoa-research-2017/444-thematic-6.html>.
- Houba.V. *et al*. 1996. Estado del arte y desarrollos futuros en análisis de suelos para la evaluación de la biodisponibilidad. (En línea) Science of The Total Environment. Vol. 178, páginas 21-28. Consultado el 24 de jun. De 2020. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/004896979504793X>
- Hoyos J. 2018. Determinación del contenido de cadmio en almendras de cacao (*Theobroma cacao*. L) cultivado bajo tres sistemas de producción. (En línea). Consultado el 4 de nov. 2018. Disponible en <http://repositorio.unu.edu.pe/handle/UNU/3683>.
- Huauya, M. y Huamani, H. 2014. Macrofauna edáfica y metales pesados en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L) (Malvaceae). (En línea). Consultado el 24 de nov. 2018. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4754850>

- IICO (organización internacional del cacao). 2020. Cultivo del cacao. (En línea). Consultado el 16 de oct. 2020. Disponible en <https://www.icco.org/about-cocoa/growing-cocoa.html>
- Iglesias, S. *et al.* 2018. El rendimiento del maíz (*Zea maiz* L) mejora con el uso del Biochar de eucalipto. (En línea). Consultado el 20 de nov. 2018. Disponible en [http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientia\\_agrop/article/view/1730/1701](http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientia_agrop/article/view/1730/1701)
- Ines. D. 2011. Acumulación de metales (cadmio, zinc, cobre, cromo, níquel y plomo) en especies del género *Pelargonium*: suministro desde el suelo, ubicación en la planta y toxicidad. Tesis. (En línea). Consultado 1 de sep. 2020. disponible en <http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/doctorado/2011orronodanielaines.pdf>
- ISCR (international Symposium on Cocoa Research). 2017. Niveles e cadmio en el chocolate. Consultado en línea el 20 de nov. 2018. Disponible en [https://www.icco.org/about-us/international-cocoa-agreements/cat\\_view/68-icco-workshops-and-seminars/352-international-cocoaresearch-symposium-lima-peru-2017/438-proceedings-of-theinternational-symposium-on-cocoa-research-2017/444-thematic-6.html](https://www.icco.org/about-us/international-cocoa-agreements/cat_view/68-icco-workshops-and-seminars/352-international-cocoaresearch-symposium-lima-peru-2017/438-proceedings-of-theinternational-symposium-on-cocoa-research-2017/444-thematic-6.html)
- INIAP (Estacion Experimental Tropical Pichilingue ). 1998. Manual del cultivo de cacao. (En línea). Consultado el 16 de oct. 2020. Disponible en <https://books.google.com.pe/books?id=UoYzAQAAMAAJ&printsec=frontcover&dq=cultivo+de+cacao&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwi2gsXcjL3sAhVOH7kGHdHfDy4Q6AEwAXoECAUQAg#v=onepage&q=cultivo%20de%20cacao&f=false>

- INVIMA (Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos). 2016. Programa nacional de vigilancia y control de cadmio en productos derivados del cacao (licor de cacao, chocolate de mesa, cocoa en polvo y chocolatina de leche). Bogotá- Colombia. (En línea). Consultado el 17 oct. 2018. Disponible en [https://www.invima.gov.co/images/pdf/inspeccion\\_y\\_vigilancia/direccionalimentos/subsectoriales/Documentotecnico-Cadmio-en-cacao.pdf](https://www.invima.gov.co/images/pdf/inspeccion_y_vigilancia/direccionalimentos/subsectoriales/Documentotecnico-Cadmio-en-cacao.pdf).
- Jácome, D. 2017. Efecto de la inoculación de hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) sobre un sistema suelo – planta de cacao en suelos contaminados con cadmio en etapa de vivero. (En línea). Consultado el 21 de sep. 2018. Disponible en <http://bdigital.unal.edu.co/62271/1/52817213.2017.pdf>
- Jaramillo, M. 2018. Aplicación de enmiendas orgánicas y Biochars derivados de la industria oleícola en el cultivo del arroz: influencia en la dinámica de plaguicidas y en propiedades agronómicas. (En línea). Consultado el 2 de dic. 2018. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=46228>.
- Jimenez, C. 2015. Estado legal del cadmio en cacao (*Theobroma cacao* L): fantasía o realidad. (En línea). Consultado el 24 de oct. 2018. Disponible en [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-04552015000100009&script=sci\\_abstract&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-04552015000100009&script=sci_abstract&tlng=es)
- Jordan. A. 2005. Manual de edafología. (En línea). Consultado el 01 de sept. 2020. Disponible en <http://biblioteca.utsem-morelos.edu.mx/files/asp/topografia/manual%20De%20Edafologia-Jordan.pdf>

- Kabata - pendias. A. 2010. Trace Elemnts in Soils and Plants. (En linea). Consultado el 12 de agost. 2020. Disponible en [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=YQfMBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=trace+elements+in+soils+and+plants&ots=9mD2aluBZf&sig=Tu4H\\_vbdqxxZhzy0CITWqJ1Ybfo#v=onepage&q=trace%20elements%20in%20soils%20and%20plants&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=YQfMBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=trace+elements+in+soils+and+plants&ots=9mD2aluBZf&sig=Tu4H_vbdqxxZhzy0CITWqJ1Ybfo#v=onepage&q=trace%20elements%20in%20soils%20and%20plants&f=false)
- Khan. Y. et al. 2017. Cow manure and cow manure-derived biochar application as a soil amendment for reducing cadmium availability and accumulation by *Brassica chinensis* L. in acidic red soil. (En linea). Consultado el 22 agost. 2020. Disponible en <https://reader.elsevier.com/reader/sd//S2095311916614880?token=7005C6A8399DAD4CA16BE3C62C43226248B64857DC51FA5466B295336FAC461D23117E6AFA90A7E0B447BA1A8D99641C>
- Kutner, M. H.; Nachtsheim, C. J.; Neter, J. (2004). *Applied Linear Regression Models* (4th edición). McGraw-Hill Irwin.
- Lahori. A. *et al.* 2017. Use of biochar as an amendment for remediation of heavy metal contaminated soils: prospects and challenges. *Pedosphere* . (En linea) consultado 24 de agosto. 2020. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1002016017604909>
- Lara, V. 2017. Evaluación del contenido de cadmio en dos variedades de cacao (*Theobroma cacao* L.) considerando distintos métodos de secado en la localidad de Luz de América. (En línea). Consultado en línea el 24 de nov. 2018. Disponible en [http:// www.bibliotecasdelecuador.com/Record/ir-:210002962/UserComments](http://www.bibliotecasdelecuador.com/Record/ir-:210002962/UserComments)
- Lehmann. J. y Joseph.S. 2009. *Biochar for Environmental Management Science and Technology*. (En línea). International Biochar Initiative. (IBI). Consultado el 24 de febr. 2020. Disponible en: [https://biocharinternational.org/ibiublications/#Biochar\\_for\\_Env\\_Management](https://biocharinternational.org/ibiublications/#Biochar_for_Env_Management)



- Lozano. Z. 2012. Disponibilidad De Fósforo En Un Suelo De Las Sabanas Bien Drenadas Venezolanas, Bajo Diferentes Coberturas Y Tipos De Fertilización. (En línea). Consultado el 01 de sep. 2020. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/339/33925550005.pdf>
- Llactas Flores, M. 2016. Influencia de la dosis de aplicación de dolomita en la concentración de cadmio en las almendras de cacao en parcelas de la Coopain. Tesis. (En línea). Consultado 09 de jun. 2020. Disponible en [http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/1301/LLFM\\_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/1301/LLFM_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Mendez, A. 2017. Cambio en las propiedades químicas de un biochar de sarmientos de vid por adición a pilas de compostaje. (En línea). Consultado en línea el 4 de oct. 2018. Disponible en <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/25146/1/TFM-I-659.pdf>
- Morel. J-L. *et al.* 2002. Phytoremediation of Metal-Contaminated Soils. (En línea) consultado 01 de agost. 2020. Disponible en <https://link.springer.com/book/10.1007/1-4020-4688-X>
- Olmo .M. 2016. Efectos del biochar sobre el suelo, las características de la raíz y la producción vegetal. Editorial. Universidad de Córdoba. (En línea). Consultado el 24 de oct. 2018. Disponible en <file:///H:/tesisi/IMPRIMIR/BIOCHAR/TESIS%20DOCT.%20BIOCHAR%20EFFECTO%20EN%20SUELO%20.pdf>
- Paco. D. 2012. Evaluación de efectos de varios tipos de Biochar en suelo y planta. (En línea). Consultado el 21 de no. 2018. Disponible en [https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2012/hdl\\_2072\\_202695/PFC\\_DanielPacoAbenza.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2012/hdl_2072_202695/PFC_DanielPacoAbenza.pdf)

- Prieto, J. *et al.* 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. (En línea). Consultado el 21 de sep. 2018. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/939/93911243003.pdf>
- Rodríguez, H. 2017. Dinámica del cadmio en suelos con niveles altos del elemento, en zonas productoras de cacao de Nilo y Yacopi, Cundinamarca. (En línea). Consultado el 6 de oct. 2018. Disponible en <http://bdigital.unal.edu.co/62280/352/1019048469.2017.pdf>
- Rodríguez, M. y Rengifo, J. 2017. Evaluación del contenido de metales pesados (Cd y Pb) en diferentes edades y etapas fenológicas del cultivo de cacao en dos zonas del alto Huallaga (Peru). (En línea). Consultado el 27 de nov. 2018. Disponible en <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1299>
- Romero, K. *et al.* 2017. Evaluación de materiales como potenciales retenedores de metales pesados para su aplicación como enmiendas en suelos contaminados. (En línea). Consultado el 4 de nov. 2018. Disponible en <http://revistas.unicordoba.edu.co/conferencias/index.php/siga/2017/paper/viewFile/187/181>
- Rosas, J. 2015. Producción de biochar a partir de viñas agotadas mediante pirolisis en reactor a escala piloto y en reactor móvil energéticamente sostenible. (En línea) Consultado el 4 de oct. 2018. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=44918>.
- Sánchez, G. 2016. Ecotoxicología del cadmio. Riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio. Consultado el 27 de oct. 2018. (En línea) Disponible en <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/GARA%20SANCHEZ%20BARRON.pdf>

- Sánchez, N. *et al.* 2011. Cadmio disponible en dos suelos de Venezuela: efecto del fosforo. Consultado el 4 de oct. 2018. (En línea). Disponible en <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/v18n2/art01.pdf>
- Subero. N. 2016. Fraccionamiento De Fósforo En Suelos Cultivados Con Arroz Por Largos Períodos De Tiempo. li. Relación Fósforo OrgánicoInorgánico. (En línea). Consultado el 01 de sep. 2020. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/857/85745749002.pdf>
- Savedra. D. Del socorro. M. Jiron. P. 2004. Cultivo de cacao orgánico para exportación. (En línea) .Consultado el 15 de oct. 2020. Disponible en [https://books.google.com.pe/books?id=jeUqAAAAYAAJ&pg=PA1&dq=Cultivo+de+cacao+organico+para+exportaci%C3%B3n.+saavedra&hl=es419&sa=X&ved=2ahUKEwiRhtzGir\\_sAhVSIbkGHd5D0MQ6AEwAXoECAQQAg#v=onepage&q=Cultivo%20de%20cacao%20organico%20para%20exportaci%C3%B3n.%20saavedra&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=jeUqAAAAYAAJ&pg=PA1&dq=Cultivo+de+cacao+organico+para+exportaci%C3%B3n.+saavedra&hl=es419&sa=X&ved=2ahUKEwiRhtzGir_sAhVSIbkGHd5D0MQ6AEwAXoECAQQAg#v=onepage&q=Cultivo%20de%20cacao%20organico%20para%20exportaci%C3%B3n.%20saavedra&f=false)
- Sik. Y. *et al.* 2016. Biochar Production, Characterization, and Applications. (En línea). International Biochar Initiative. (IBI). (En línea). Consultado el 24 de febr. 2020. Disponible en [https://biochar-international.org/ibipublications/#Biochar\\_for\\_Env\\_Management](https://biochar-international.org/ibipublications/#Biochar_for_Env_Management)
- Suppadit. T. *et al.* 2012. Efecto del biocarbón de la hojarasca de codorniz sobre la productividad de cuatro nuevas variedades de frutos secos plantados en suelos contaminados con cadmio. (En línea). Consultado el 01 de sept. 2020. Disponible en <https://scielo.conicyt.cl/pdf/chiljar/v72n1/at20.pdf>

- Tantalean, E y Huauya, M. 2017. Distribución del contenido de cadmio en los diferentes órganos del cacao CCN 51 en suelo aluvial y residual en las localidades de Jacintillo y Ramal de Azpusana. (En línea). Consultado en línea el 21 de sep. 2018. Disponible en [http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/1242/TPE\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/1242/TPE_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Tantalean. E. 2017. Distribución del contenido de cadmio en los diferentes órganos del cacao CCN 51 en suelo aluvial y residual. (En línea). Consultado el 4 de nov. 2018. (En línea). Disponible en <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1242>
- Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., & Gu, Y. (2015). Chemosphere Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. CHEMOSPHERE. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.058>
- Vasquez. N. 2020. efecto del carbón activado de semillas de aguaje (*Mauritia flexuosa* L.f.) en la estabilización de cadmio (Cd) en el suelo y su acumulación en tejidos de plantones de cacao (*Theobroma cacao* L). (en línea). Consultado el 01 de sept. 2020. Disponible en [http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/4293/UNU\\_AMBIENTAL2020\\_T\\_NANCY-VASQUEZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/4293/UNU_AMBIENTAL2020_T_NANCY-VASQUEZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Villanueva. H. 2008. Analisis Y Propuesta La La Instalacion De Una Subestacion Termo-Pluviometrica En El Sector De Huamancoto, Distrito De Alomia Robles, Provincial De Leoncio Prado - Huanuco. Tesis. (En línea). Consultado el 24 de may. 2020. Disponible en: <http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/404/T.CSA150.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Wang.Y.*et al.* 2020. Stabilization of heavy metal- contaminated soils by biochar: challenges and recommendations. (En línea) Science of The Total Environment. Consultado el 24 de jul. 2020. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720325778>.

Zhang, J., Jiang, F., Shen, Y., Zhan, Q., Bai, B., Chen, W., & Chi, Y. (2019). Transcriptome analysis reveals candidate genes related to phosphorus starvation tolerance in sorghum. BMC Plant Biology, 19(1), 1–18. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1914-8>

## **ANEXOS**

## CUADROS

**Cuadro 10. Cadmio disponible y total en suelo**

Tratamiento	Cd total en suelo (ppm)	Cd disp en suelo (ppm)
T1 R1	0,63	0,2828
T1 R2	0,675	0,208
T1 R3	0,59	0,2836
T2 R1	0,565	0,2344
T2 R2	0,615	0,25
T2 R3	0,61	0,276
T3 R1	0,685	0,1968
T3 R2	0,61	0,1948
T3 R3	0,62	0,1812

**Cuadro 11. Cadmio en hojas y almendras**

Tratamiento	Cd en hoja (ppm)	Cd en grano (ppm)
T1 R1	1,53	1,03
T1 R2	1	0,925
T1 R3	1,235	0,865
T2 R1	0,97	0,505
T2 R2	1,64	0,84
T2 R3	1,395	0,86
T3 R1	1,435	0,74
T3 R2	1,32	0,91
T3 R3	1,12	0,975

Cuadro 12. Determinación De Textura

TRATAMIENTO	1° LECTURA		2° LECTURA		± LC		% L + Ar	% A0	% Ar	% L	total
	higrómetro	termómetro	higrómetro	termómetro	1°	2°					
	T1 R1	28	24,8	11	24,9	28,36					
T1 R2	33	26,9	13	25,8	33,36	12,64	66,72	33,28	25,28	41,44	100
T1 R3	29	26,5	13	25,2	29,36	12,64	58,72	41,28	25,28	33,44	100
T2 R1	33	24,9	9	25	33,36	8,64	66,72	33,28	17,28	49,44	100
T2 R2	31	27,9	13	26,3	31,36	12,64	62,72	37,28	25,28	37,44	100
T2 R3	32	24,6	11	24,8	32,36	10,64	64,72	35,28	21,28	43,44	100
T3 R1	33	27,3	14	26	33,36	13,64	66,72	33,28	27,28	39,44	100
T3 R2	33	26,7	13	25,8	33,36	12,64	66,72	33,28	25,28	41,44	100
T3 R3	28	24,8	11	25	28,36	10,64	56,72	43,28	21,28	35,44	100



**Cuadro 13. Determinación de pH**

<b>Tratamiento</b>	<b>PH</b>	<b>Denominación</b>
<b>T1 R1</b>	6,7	neutro
<b>T1 R2</b>	7	neutro
<b>T1 R3</b>	7,24	neutro
<b>T2 R1</b>	7,74	levemente alcalino
<b>T2 R2</b>	6,92	neutro
<b>T2 R3</b>	7,5	levemente alcalino
<b>T3 R1</b>	7,06	neutro
<b>T3 R2</b>	7,51	levemente alcalino
<b>T3 R3</b>	7,27	neutro

**Cuadro 14. Determinación de % de carbonatos**

<b>TRATAMIENTO</b>	<b>GASTO</b>	<b>ml de HCl 0.1 N en 2 gr de suelo</b>	<b>gr CaCO<sub>3</sub> / 2gr de suelo</b>	<b>% de CaCO<sub>3</sub></b>	<b>NIVEL</b>
<b>T1 R1</b>	13,8	6,2	0,031	1,55	medio
<b>T1 R2</b>	10,7	9,3	0,0465	2,325	alto
<b>T1 R3</b>	11	9	0,045	2,25	Alto
<b>T2 R1</b>	6	14	0,07	3,5	alto
<b>T2 R2</b>	13,7	6,3	0,0315	1,575	medio
<b>T2 R3</b>	11,2	8,8	0,044	2,2	alto
<b>T3 R1</b>	12,2	7,8	0,039	1,95	medio
<b>T3 R2</b>	10,25	9,75	0,04875	2,4375	alto
<b>T3 R3</b>	11,35	8,65	0,04325	2,1625	alto

**Cuadro 15. Determinación de materia orgánica**

<b>TRATAMIENTO</b>	<b>GASTO de FeSO<sub>4</sub> amoniacal 0,2 N</b>	<b>Sm 1 (gasto corregido de sulfato ferroso amoniacal )</b>	<b>% Carbon Organico</b>	<b>% M.O</b>	<b>NIVEL</b>
<b>T1 R1</b>	5,7	5,59	1,76	3,04	medio
<b>T1 R2</b>	5,8	5,69	1,73	2,97	medio
<b>T1 R3</b>	9	8,82	0,47	0,81	bajo
<b>T2 R1</b>	6	5,88	1,65	2,84	medio
<b>T2 R2</b>	3,5	3,43	2,63	4,53	alto
<b>T2 R3</b>	4,6	4,51	2,20	3,79	medio
<b>T3 R1</b>	4,5	4,41	2,24	3,85	medio
<b>T3 R2</b>	5	4,90	2,04	3,52	medio
<b>T3 R3</b>	3,7	3,63	2,55	4,39	alto

**Cuadro 16. Determinación de capacidad de intercambio catiónico**

<b>TRATAMIENTO</b>	<b>GASTO de NaOH 0,1 N ml</b>	<b>C.I.C (cmol/kg )</b>	<b>Nivel</b>
<b>T1 R1</b>	10	30	Muy alto
<b>T1 R2</b>	8,4	33,2	Muy alto
<b>T1 R3</b>	16.7	16.6	Alto
<b>T2 R1</b>	14,2	21,6	alto
<b>T2 R2</b>	12,9	24,2	Muy alto
<b>T2 R3</b>	13,8	22,4	Muy alto
<b>T3 R1</b>	10,55	28,9	Muy alto
<b>T3 R2</b>	13,1	23,8	Muy alto
<b>T3 R3</b>	14,85	20,3	Alto

**Cuadro 17. Determinación de fosforo disponible**

<b>Tratamiento</b>	<b>LECTURA mg fosforo / L (espectofotometro)</b>	<b>fosforo disponible ppm</b>
<b>T1 R1</b>	0,26	8,505
<b>T1 R2</b>	0,255	8,263
<b>T1 R3</b>	0,389	8,200
<b>T2 R1</b>	0,378	14,183
<b>T2 R2</b>	0,636	26,589
<b>T2 R3</b>	0,363	13,473
<b>T3 R1</b>	0,385	14,534
<b>T3 R2</b>	0,343	12,508
<b>T3 R3</b>	0,345	12,605

**Cuadro 18. Peso de hojas**

<b>TRATAMIENTO</b>	<b>PESO INICIAL</b>	<b>PESO FINAL</b>	<b>PESO SECO</b>
<b>T1 R1</b>	29,98	14,13	15,85
<b>T1 R2</b>	31,99	14,2	17,79
<b>T1 R3</b>	32,3	14,48	17,82
<b>T2 R1</b>	31,85	12,46	19,39
<b>T2 R2</b>	25,45	12,38	13,07
<b>T2 R3</b>	29,08	12,58	16,5
<b>T3 R1</b>	31,01	13,73	17,28
<b>T3 R2</b>	31,78	14,21	17,57
<b>T3 R3</b>	35,29	16,21	19,08

## PANEL FOTOGRÁFICO



**Figura 9.** Instalación de tesis.



**Figura 10.** Rotulado de etiquetas



**Figura 11.** Identificación de plantas.



**Figura 12.** Identificación de frutos.



**Figura 13.** Etapas de triturado del biochar.



**Figura 14.** Pesado del biochar.



**Figura 15.** Tara del biochar.





**Figura 16.** Aplicación del biochar al suelo.



**Figura 17.** Preparación del hidrogel.



**Figura 18.** Aplicación del hidrogel sobre el biochar.



**Figura 19.** Tapado del biochar + hidrogel con la hojarasca.



**Figura 20.** Evaluación de la humedad del suelo (a), evaluación de las mazorcas (b).



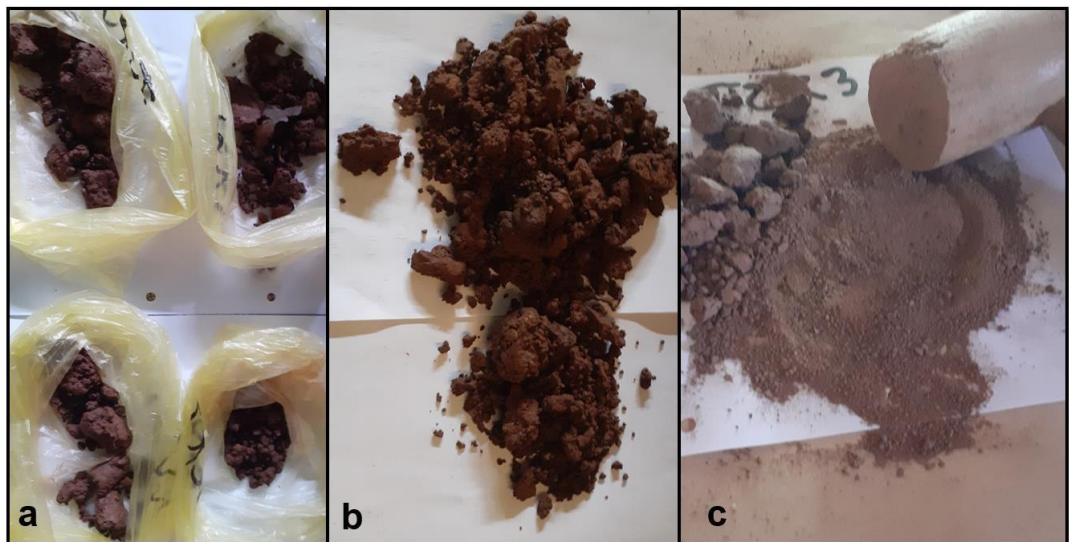
**Figura 21.** Riego (a), tapado con hojarasca después del riego (b).



**Figura 22.** Muestreo de suelo con barreno (a), recojo de la muestra de suelo (b).



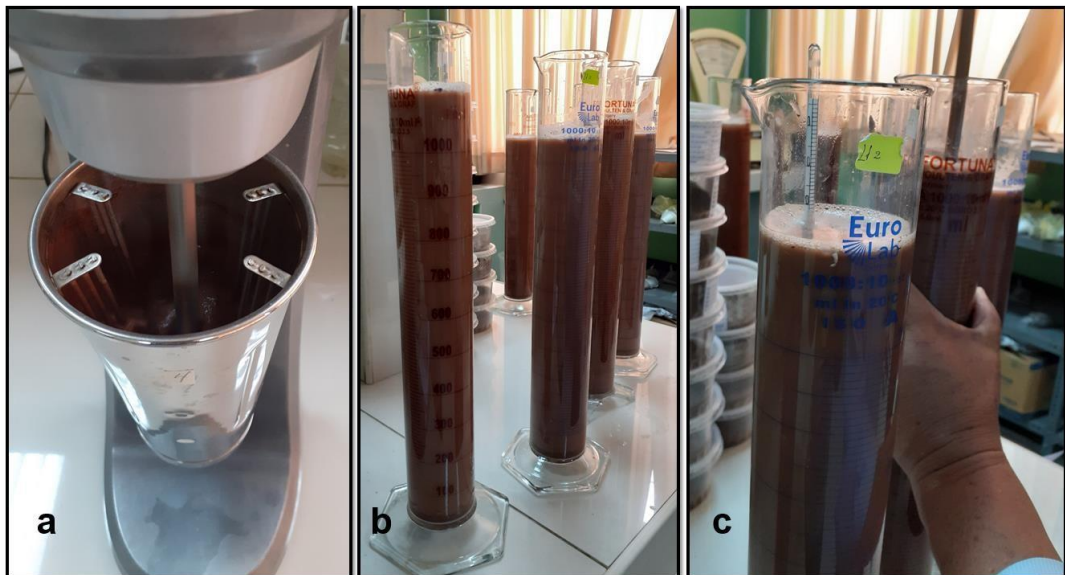
**Figura 23.** Recolecta de las mazorcas de cacao.



**Figura 24.** Muestras de suelo (a), secado del suelo (b), triturado del suelo (c).



**Figura 25.** Determinación de pH. Maceración de las muestras (a), lectura de pH con el potenciómetro (b).



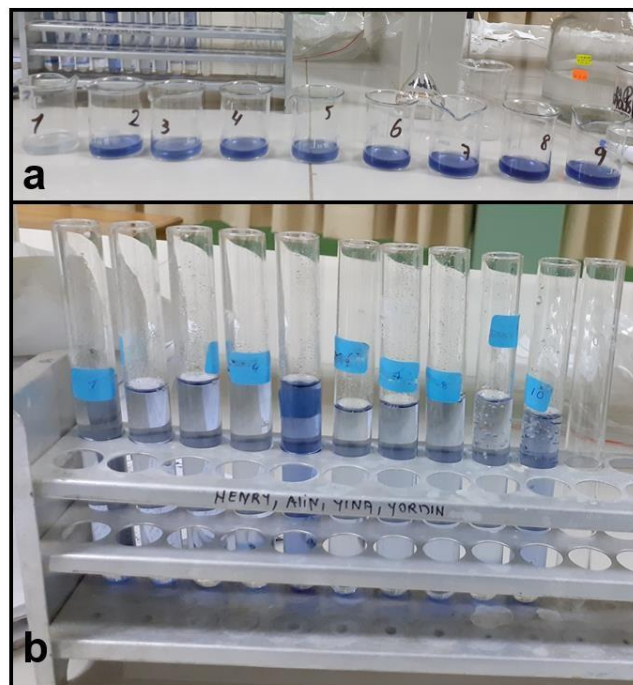
**Figura 26.** Determinación de textura. Dispersión de la muestra (a), reposo de las muestras de suelo (b), lectura del hidrómetro (c).



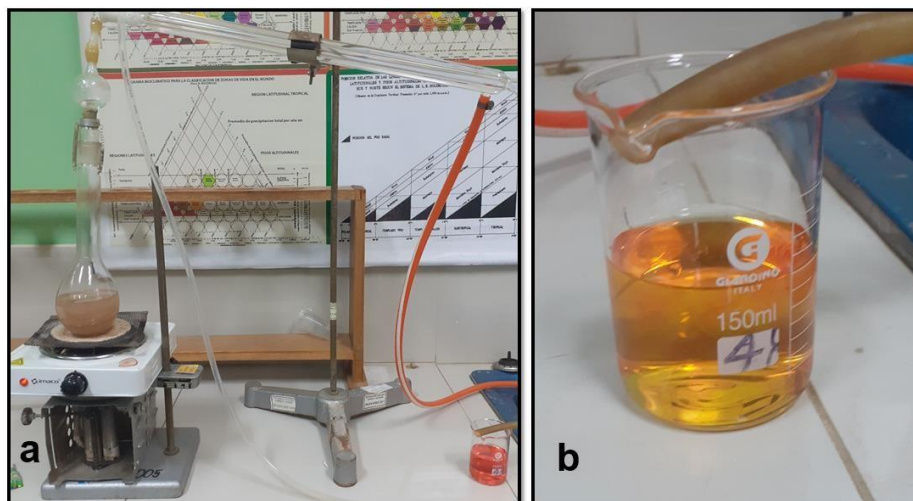
**Figura 27.** Determinación de carbonatos. Alícuota del filtrado (a), titulado de la muestra (b).



**Figura 28.** Determinación de materia orgánica. Muestras dispersadas (a), muestras tituladas (b).



**Figura 29.** Determinación de fósforo disponible. Alícuotas para la construcción de la línea de tendencia, (a), alícuotas de la solución suelo (b).



**Figura 30.** Determinación de capacidad de intercambio catiónico. Destilado de la muestra (a), muestra para titulación (b).



**Figura 31.** Cortado de la mazorca de cacao (a), despulpado de las mazorcas (b).





**Figura 32.** Fermentado de los granos.



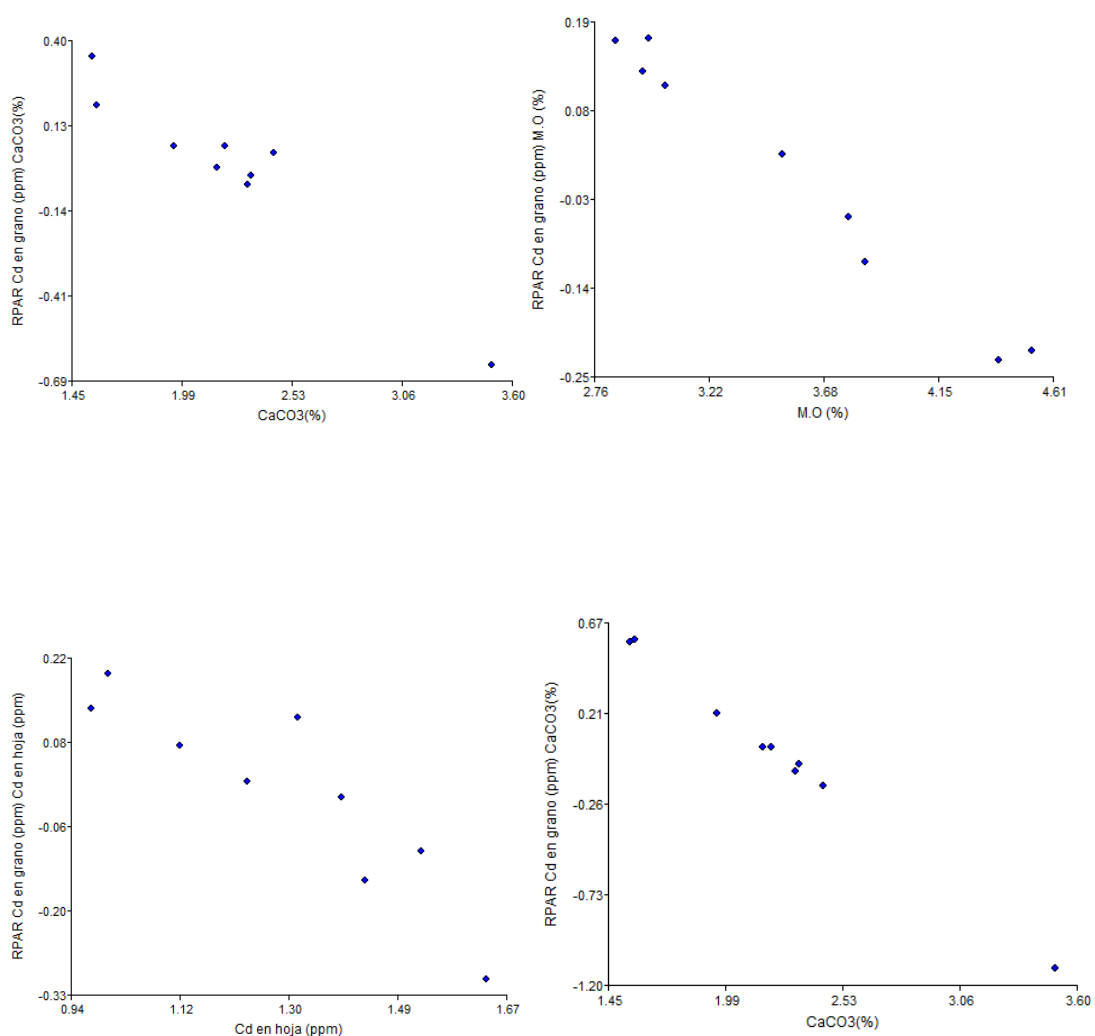
**Figura 27.** Secado de los granos de cacao.

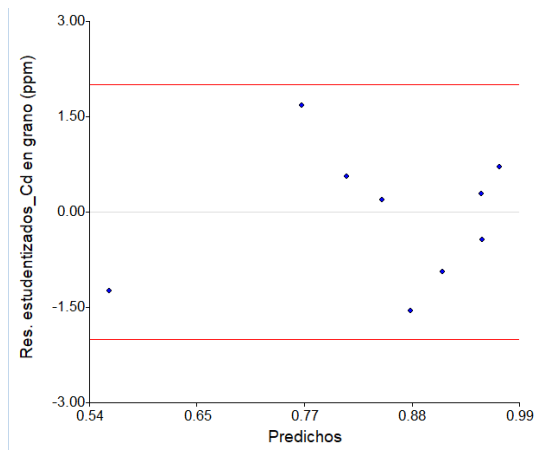
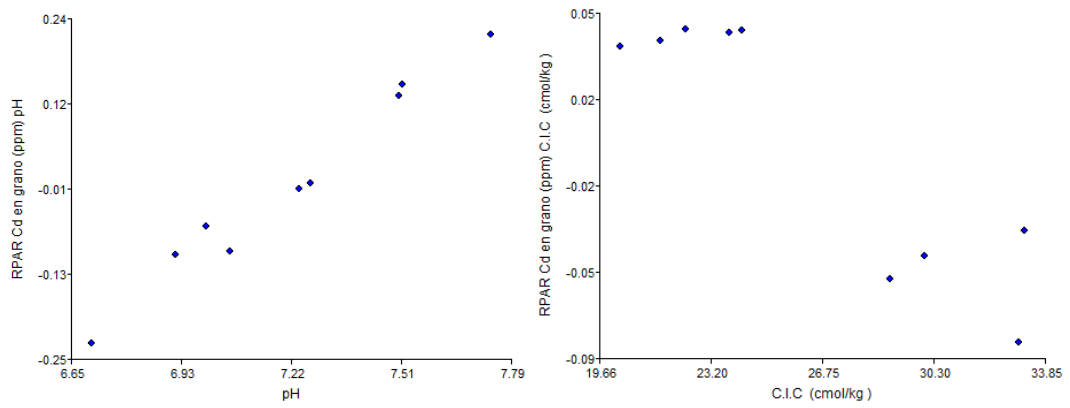
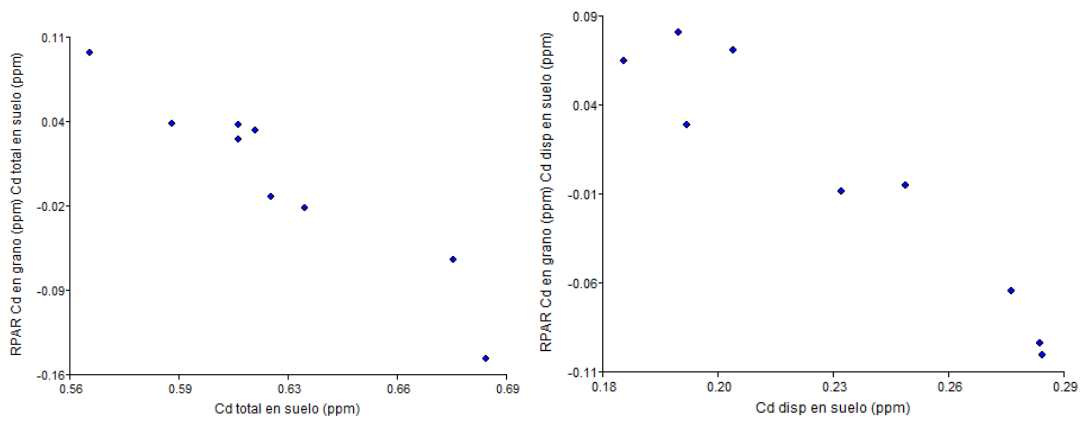


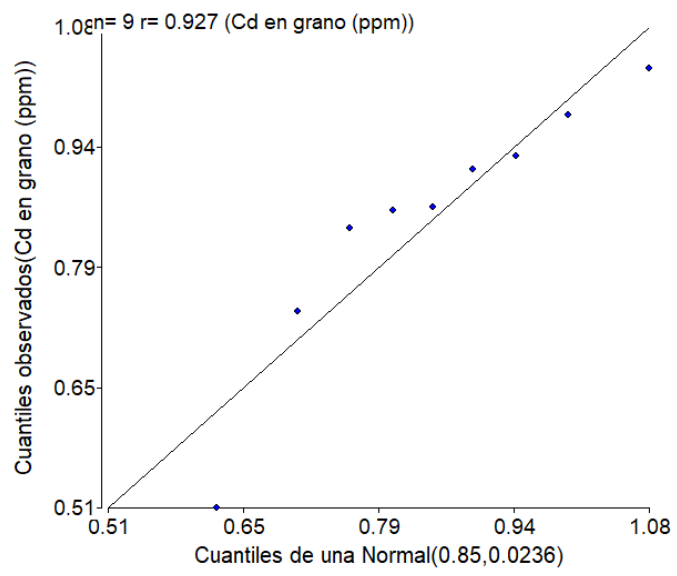
**Figura 28.** Triturado con el molinillo de las muestras de hoja y almendras de cacao.

**Figura 29: Análisis de supuestos para análisis de regresión múltiple****a) Análisis de residuos parciales**

Primero se realizó un análisis de residuos parciales para cada variable en estudio. Esto con el fin de verificar si alguna variable podría tener una tendencia polinomial. En las figuras se pueden apreciar que cada variable que se introdujo al modelamiento tuvo una relación lineal con la variable respuesta (Cd en granos).





**b) Prueba de normalidad**

### c) Prueba de colinialidad

Este supuesto indica si las variables predictoras son o no independientes entre sí. Si existe dependencia entre estas variables se dice que existe problema de colinialidad. Este problema podría afectar a la magnitud de los coeficientes y signos del modelo, además podría agrandar el error estándar, lo que no resulta luego en un deficiente modelo matemático. En este estudio se vio que ninguna de las variables presentó problemas de colinialidad, puesto que el factor de inflación de la varianza (VIF) no sobrepasó a 10. Kutner et al. (2004) indican que existe multicolinialidad si el  $VIF > 10$ . Vale aclarar que la selección de las variables predictoras fue realizado con la prueba de Stepwise, que es el más recomendable por muchos autores debido a su mayor potencia.

#### Cuadro 6. Análisis de regresión lineal

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
Cd en grano (ppm)	9	0,70	0,60	0,03	-12,15	-11,37

Selección Stepwise

Máximo p-valor para entrar: 0,15

Máximo p-valor para retener: 0,15

Número original de regresoras: 6, regresoras retenidas en el modelo 2

#### Cuadro 7. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados.

Coeficiente	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Const	2,22	0,51	0,97	3,48	4,32	0,005		
CaCO <sub>3</sub> (%)	-0,35	0,10	-0,59	-0,10	-3,47	0,013	13,03	2,80
Cd en hoja (ppm)	-0,47	0,25	-1,07	0,13	-1,90	0,050	4,63	2,80

**Título: BIOCHAR COMO INMOVILIZADOR DE CADMIO EN SUELO Y SU EFECTO EN EL GRANO DEL CULTIVO DE CACAO (*Theobroma cacao* L) EN LA LOCALIDAD DE PUMAHUASI-HUANUCO**

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES
<b>General</b> ¿Cuál es el efecto del biochar en la concentración de cadmio en el suelo y planta del cacao ( <i>Theobroma cacao</i> L.) la localidad de Pumahuasi – Huánuco 2020?	<b>General</b> Evaluar el efecto de biochar en la concentración de cadmio en el suelo, y planta del cacao ( <i>Theobroma cacao</i> L.) en la localidad de Pumahuasi – Huánuco	<b>General</b> Si, aplicamos biochar al cultivo de cacao, entonces tendremos efecto significativo en la disminución del cadmio en el suelo y planta en condiciones edafoclimáticas de Pumahuasi – Huánuco.	<b>Independiente</b> <b>A)</b> Biochar  <b>Dependiente</b> <b>B)</b> Concentración de Cadmio (Cd)  <b>Interviniente</b> <b>C)</b> Condiciones edafoclimáticas	<b>a)</b> Niveles: 10 g. kg-1 y 20 g. kg-1  <b>b1)</b> Suelo <b>b2)</b> Planta  <b>c1)</b> Clima <b>c2)</b> Suelo
<b>Problemas específicos</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>Hipótesis específicas</b>	<b>Sub variables</b>	<b>Subindicadores</b>
a) ¿Cuál es el efecto de los niveles 10 y 20 g.kg-1 de biochar en la concentración de Cadmio disponible y total en el suelo?	a) Evaluar el efecto de los niveles de 10 y 20 g.kg-1 de biochar, en la concentración de Cadmio disponible y total en el suelo	a) Si aplicamos los niveles 10 y 20 g.kg-1 de biochar, entonces disminuirá significativamente el cadmio disponible y total en el suelo.	a) Niveles: 10 g.kg-1 y 20 g.kg-1  b) Cadmio total y disponible.	Por área neta experimental  ppm
¿Cuál es el efecto de los niveles 10 y 20 g.kg-1 de biochar en la concentración de Cadmio total en planta (hojas y granos)	Evaluar el efecto de los niveles 10 y 20 g.kg-1 de biochar en la concentración de Cadmio total en planta (hojas y granos)	Si aplicamos los niveles 10 y 20 g.kg-1 de biochar, entonces, disminuirá significativamente el cadmio total en planta (hojas y granos.)	a) Niveles: 10 g. kg-1 y 20 g.kg-1  cadmio total en la planta.	Por área neta experimental  Hoja Granos
¿Cuál es la relación de las características del suelo con el contenido de cadmio en los granos de cacao?	Relacionar las características del suelo con el contenido de cadmio en los granos de cacao.	Las características del suelo están relacionadas significativamente con el contenido de cadmio en los granos de cacao	Características del suelo  Contenido de cadmio	Físicas y químicas.  Granos

TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACION	POBLACION Y MUESTRA	DISEÑO DE INVESTIGACION	TECNICAS DE RECOLECCION DE INFORMACION	INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE INFORMACION
<p><b>Tipo</b> Aplicada porque se recurrió a los principios de la ciencia del suelo, química ambiental y cultivos tropicales para solucionar el problema del efecto del biochar sobre el contenido de cadmio en el suelo y planta generando tecnología para la disminución del cadmio en los suelos y planta (almendras y hojas) del cacao. Sustentado en Sánchez Carlessi (1998) indica que “la investigación aplicada se caracteriza por su interés en la aplicación de los conocimientos teóricos a determinada situación concreta y constituye el primer esfuerzo para transformar los conocimientos científicos en tecnológicos”. <b>Nivel de investigación</b> Experimental porque se manipulo la variable independiente (biochar) se midió la variable dependiente (concentración de cadmio) y se comparó con un testigo (si aplicación de biochar). Sustentado en Hernández y otros (2014), quien afirma que “un estudio en el que se manipula intencionalmente una o más variables independientes, para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes, dentro de una situación de control para el investigador”.</p>	<p><b>Población</b> La población constituida por el suelo y 45 plantas de cacao del clon CCN51 de 8 años de edad por experimento.</p> <p><b>Muestra</b> Conformada por 9 plantas de cacao de los que se extrajo 9 muestras de suelo, hojas y mazorcas, conformando el área neta experimental.</p> <p><b>Tipo de muestreo</b> Probabilístico en su forma de muestreo aleatorio simple (MAS) porque cualquier parte del suelo y plantas del área experimental (hojas y almendras) tuvieron la misma oportunidad de formar parte de la muestra</p>	<p><b>Tipo de diseño</b> Experimental con diseño de bloques completos al azar (DBCA), constituido de 3 bloques, 3 tratamientos haciendo un total de 9 unidades experimentales.</p> <p><b>Técnicas estadísticas</b> El análisis de varianza (ANDEVA) al nivel de significancia del 5% para repeticiones y tratamientos y para la comparación de los promedios la prueba de LSD al 5%. Análisis de regresión multiple para prueba de hipótesis.</p> <p>Para el procesamiento de los datos se utilizó el programa Table curve y Smart y la presentación de los datos en tablas analizadas estadísticamente y las figuras representadas en forma de líneas de tendencia.</p>	<p><b>Técnicas bibliográficas</b></p> <p><b>Fichaje</b></p> <p><b>Análisis de contenido</b></p> <p><b>Técnicas de campo</b> <b>Observación</b> Permite recolectar los datos directamente del campo experimental.</p>	<p><b>Instrumentos bibliográficos</b></p> <p><b>Fichas de localización:</b> Para la elaboración de la literatura citada con sus elementos bibliográficos: (Autor, año, título, sub título si lo hubiera, edición, lugar de publicación, editorial, paginación</p> <p><b>Fichas de investigación.</b> Para la elaboración del sustento teórico siendo estas de  <b>a)</b> textuales  <b>b)</b> resumen  <b>c)</b> comentarios</p> <p><b>Instrumentos de campo</b> <b>Libreta de campo</b> Donde se anotará las observaciones realizadas y labores agronómicas y culturales del campo experimental</p>





# UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

TINGO MARIA  
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN  
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN



## ANALISIS

SOLICITANTE: Universidad Nacional Hermilio Valdizan

DEPARTAMENTO: Huánuco

INVESTIGACION: Biochar como inmovilizador de cadmio en suelo y su efecto en el grano del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L) en la localidad de Pumahuasi- Huanuco.

PROVINCIA: Leoncio Prado

DISTRITO: Daniel Alomia Robles

Codigo	Cd total en suelo (ppm)	Cd disp en suelo (ppm)	Cd en hoja (ppm)	Cd en grano (ppm)
1	0,63	0,2828	1,53	1,03
2	0,675	0,208	1	0,925
3	0,59	0,2836	1,235	0,865
4	0,565	0,2344	0,97	0,505
5	0,615	0,25	1,64	0,84
6	0,61	0,276	1,395	0,86
7	0,685	0,1968	1,435	0,74
8	0,61	0,1948	1,32	0,91
9	0,62	0,1812	1,12	0,975

Equipo: ISP OES/ HORIBA – ultima expert.

Nota: muestras digeridas por el solicitante.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN  
Dra. Elizabeth Ordoñez Gomez  
DIRECTORA

Ing. Sánchez Rodríguez Miguel  
ESPECIALISTA AREA ICP OES