

UNIVERSIDAD  
**CIENTÍFICA**  
DEL SUR

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“EFECTO DE LA UREA EN LA ABSORCIÓN DE PLOMO EN LA ESTRUCTURA FOLIAR DE MAÍZ (*Zea mays* L.), ESPINACA (*Spinacia oleracea* L.) Y COL (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.)”

Tesis para optar el título profesional de:

INGENIERA AMBIENTAL

Presentado por:

Bachiller Zelma Beatriz Peñafiel Sandoval

Asesor:

Dr. José Alberto Iannacone Oliver

Lima – Perú

2019

### ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Lima, 04 de junio de 2019.

Los integrantes del Jurado de tesis:

Presidente: Dr. Miguel Antonio Fernandez Sampedro
Integrante: Dra. Gladys Liliana Lino Villanueva
Integrante: Mg. Mirtha Rosario Nazario Ramirez

Se reúnen para evaluar la tesis titulada:  
**"Efecto de la urea en la absorción de plomo en la estructura foliar de maíz (*Zea Mays L.*)  
 espinaca (*Spinacia oleracea L.*) y col (*Brassica oleracea var. Capitata L.*)"**

Presentada por los estudiantes:

- **Zelma Beatriz Peñafiel Sandoval**

Para optar el Título Profesional de **Ingeniera Ambiental**

Asesorada por:

- **Dr. José Alberto Iannacone Oliver**

Luego de haber evaluado el informe final de tesis y evaluado el desempeño de los estudiantes en la sustentación, concluyen de manera unánime (X) por mayoría simple ( ) calificar a:

Integrante 1: Zelma Beatriz Peñafiel Sandoval		Nota (escrito): <b>DIECISEIS</b>	
Aprobado ( )	Aprobado - Muy buena (X)	Aprobado - Sobresaliente ( )	Desaprobado ( )

Los miembros del jurado firman en señal de conformidad.



\_\_\_\_\_  
**Presidente del Jurado**



\_\_\_\_\_  
**Miembro del Jurado**



\_\_\_\_\_  
**Miembro del Jurado**



\_\_\_\_\_  
**Asesor**

### DEDICATORIA

A Dios, por la bendición de darme una familia maravillosa y poner personas en mi camino para alcanzar mis metas trazadas. A mis padres, Orlando Peñafiel y Elena Sandoval, por ser mi ejemplo, guía y apoyo incondicional durante toda mi vida.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme brindado la fortaleza y haberme guiado hasta el día de hoy, a mis padres, Orlando y Elena por los valores inculcados y su apoyo incondicional.

A mi asesor, Dr. José Alberto Iannacone Oliver, por su apoyo, confianza, dedicación, paciencia y enseñanzas.

A mi casa de estudios la Universidad Científica del Sur, por todos los conocimientos, enseñanzas y el apoyo con sus instalaciones para llevar a cabo esta tesis.

A mis jurados de tesis, por los aportes y recomendaciones brindados.

Y a todos aquellos que contribuyeron de una u otra forma para la culminación de la presente tesis.

Muchísimas gracias, que Dios los bendiga siempre.

**INDICE GENERAL**

	<b>pág.</b>
DEDICATORIA	.....III
AGRADECIMIENTOS	.....IV
ÍNDICE DE FIGURAS	....VII
ÍNDICE DE TABLAS	...VIII
ÍNDICE DE ANEXOS	.....X
RESUMEN	....XII
ABSTRACT	...XIII
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	.....1
II. MARCO TEÓRICO	.....3
1. <u>Bases teóricas</u>	.....3
1.1. <i>Metales pesados en la agricultura</i>	.....3
1.2. <i>Urea</i>	.....4
1.3. <i>Plomo (Pb)</i>	.....5
1.4. <i>Maíz</i>	.....8
1.5. <i>Espinaca</i>	.....9
1.6. <i>Col</i>	.....10
1.7. <i>Normativa Ambiental</i>	.....11
2. <u>Antecedentes</u>	.....11
III. OBJETIVOS	.....13
1. <u>Objetivo principal</u>	.....13
2. <u>Objetivos específicos</u>	.....13
IV. METODOLOGÍA	.....14
1. <u>Lugar de estudio y sustrato</u>	.....14
2. <u>Material vegetal y sus condiciones de cultivo</u>	.....15
3. <u>Medición de pH</u>	.....17
4. <u>Mediciones biométricas</u>	.....17
5. <u>Medición de plomo y nitrógeno en la estructura foliar</u>	.....18
6. <u>Análisis de datos</u>	.....18
7. <u>Límite máximo permisible (LMP) de plomo en alimentos</u>	.....19

8. <u>Aspectos éticos</u>	.....20
V. RESULTADOS	.....21
1. <u>Maíz</u>	.....21
2. <u>Espinaca</u>	.....22
3. <u>Col</u>	.....25
4. <u>Comparación Pb foliar, N foliar y clorofila</u>	.....25
5. <u>Raíz del maíz</u>	.....28
6. <u>Raíz de la espinaca</u>	.....28
7. <u>Raíz de la col</u>	.....30
8. <u>pH del suelo</u>	.....31
9. <u>Límite máximo permisible (LMP) de plomo en alimentos</u>	.....36
VI. DISCUSIÓN	.....38
1. <u>Efectos de los tratamientos en la clorofila</u>	.....38
2. <u>Efectos de los tratamientos en el peso fresco y peso seco</u>	.....38
3. <u>Efectos de los tratamientos en la altura</u>	.....39
4. <u>Efectos de los tratamientos en el área foliar</u>	.....40
5. <u>Respuesta de la col a los tratamientos</u>	.....40
6. <u>Respuesta de la espinaca a los tratamientos</u>	.....41
7. <u>Efecto del Pb en la raíz</u>	.....41
8. <u>Acidificación del suelo</u>	.....42
9. <u>LMP del Pb</u>	.....43
10. <u>Comparación del Pb foliar, N foliar y clorofila</u>	.....43
VII. CONCLUSIONES	.....45
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	.....46
IX. ABREVIATURAS	.....63
X. ANEXOS	.....64

## INDICE DE FIGURAS

	pág.
Figura 1.- Comparación de los cinco tratamientos en maíz ( <i>Zea mays</i> ) con respecto al comportamiento del pH del suelo.	.....31
Figura 2.- Comparación de los cinco tratamientos en la espinaca ( <i>Spinacia oleracea</i> ) con respecto al comportamiento del pH del suelo.	.....32
Figura 3.- Comparación de los cinco tratamientos en la col ( <i>Brassica oleracea</i> var. <i>capitata</i> ) con respecto al comportamiento del pH del suelo.	.....32
Figura 4.- Comparación del tratamiento control (T control) en maíz ( <i>Zea mays</i> ), la espinaca ( <i>Spinacia oleracea</i> ) y col ( <i>Brassica oleracea</i> var. <i>capitata</i> ) con respecto al comportamiento del pH del suelo.	.....33
Figura 5.- Comparación del tratamiento uno (T <sub>1</sub> ) en maíz ( <i>Zea mays</i> ), la espinaca ( <i>Spinacia oleracea</i> ) y col ( <i>Brassica oleracea</i> var. <i>capitata</i> ) con respecto al comportamiento del pH del suelo.	.....33
Figura 6.- Comparación del tratamiento dos (T <sub>2</sub> ) en maíz ( <i>Zea mays</i> ), la espinaca ( <i>Spinacia oleracea</i> ) y col ( <i>Brassica oleracea</i> var. <i>capitata</i> ) con respecto al comportamiento del pH del suelo.	.....34
Figura 7.- Comparación del tratamiento tres (T <sub>3</sub> ) en maíz ( <i>Zea mays</i> ), la espinaca ( <i>Spinacia oleracea</i> ) y col ( <i>Brassica oleracea</i> var. <i>capitata</i> ) con respecto al comportamiento del pH del suelo.	.....34
Figura 8.- Comparación del tratamiento cuatro (T <sub>4</sub> ) en maíz ( <i>Zea mays</i> ), la espinaca ( <i>Spinacia oleracea</i> ) y col ( <i>Brassica oleracea</i> var. <i>capitata</i> ) con respecto al comportamiento del pH del suelo.	.....35

## INDICE DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.- Análisis de la tierra de chacra para la selección y preparación del sustrato de invernadero.</b>	.....14
<b>Tabla 2.- Tratamientos planteados en la investigación para evaluar el efecto de la urea en la absorción de plomo.</b>	.....16
<b>Tabla 3.- Parámetros de la estación meteorológica Von Humboldt del SENAMHI, La Molina, Lima, Perú (05 de junio - 31 de agosto, 2017).</b>	.....21
<b>Tabla 4.- Efecto progresivo de la urea en la absorción de plomo en ocho variables de la estructura foliar del maíz (<i>Zea mays</i>).</b>	.....24
<b>Tabla 5.- Efecto progresivo de la urea en la absorción de plomo en ocho variables de la estructura foliar de la espinaca (<i>Spinacia oleracea</i>).</b>	.....24
<b>Tabla 6.- Efecto progresivo de la urea en la absorción de plomo en ocho variables de la estructura foliar de la col (<i>Brassica oleracea var. capitata</i>).</b>	.....26
<b>Tabla 7.- Comparación del efecto progresivo de la urea y del plomo en tres variables de la estructura foliar entre el maíz (<i>Zea mays</i>), la espinaca (<i>Spinacia oleracea</i>) y col (<i>Brassica oleracea var. capitata</i>).</b>	.....27
<b>Tabla 8.- Efecto de la urea en la absorción de plomo en cuatro variables de la raíz del maíz (<i>Zea mays</i>).</b>	.....28
<b>Tabla 9.- Efecto progresivo de la urea en la absorción de plomo en cuatro variables de la raíz de la espinaca (<i>Spinacia oleracea</i>).</b>	.....30
<b>Tabla 10.- Efecto progresivo de la urea en la absorción de plomo en cuatro variables de la raíz de la col (<i>Brassica oleracea var. capitata</i>).</b>	.....30

Tabla 11.- Valores del coeficiente de correlación de Pearson entre la dosis de urea y el tiempo de acidez del suelo en el maíz ( <i>Zea mays</i> ), la espinaca ( <i>Spinacia oleracea</i> ) y col ( <i>Brassica oleracea var. capitata</i> ).	.....35
Tabla 12.- Valores del coeficiente de correlación de Pearson entre la dosis de urea y el pH del suelo en el maíz ( <i>Zea mays</i> ), la espinaca ( <i>Spinacia oleracea</i> ) y col ( <i>Brassica oleracea var. capitata</i> ).	.....36
Tabla 13.- Valores del coeficiente de correlación de Pearson entre el pH del suelo y el Pb foliar del maíz ( <i>Zea mays</i> ), la espinaca ( <i>Spinacia oleracea</i> ) y col ( <i>Brassica oleracea var. capitata</i> ).	.....36
Tabla 14.- Comparación del plomo en la estructura foliar del maíz ( <i>Zea mays</i> ), la espinaca ( <i>Spinacia oleracea</i> ), y col ( <i>Brassica oleracea var. capitata</i> ) con el límite máximo permisible del Codex Alimentarius (legislación peruana) y legislación de otros países.	.....37

## INDICE DE ANEXOS

	pág.
Tabla Anexo 1.- Valores de prueba de normalidad mediante el estadístico Shapiro–Wilk para el maíz ( <i>Zea mays</i> ), la espinaca ( <i>Spinacia oleracea</i> ) y col ( <i>Brassica oleracea var. capitata</i> ).	.....64
Tabla Anexo 2.- Valores de prueba de homogeneidad de varianza mediante el estadístico Levene para el maíz ( <i>Zea mays</i> ), la espinaca ( <i>Spinacia oleracea</i> ) y col ( <i>Brassica oleracea var. capitata</i> ).	.....64
Tabla Anexo 3.- Valores de prueba de normalidad mediante el estadístico Shapiro–Wilk para la raíz el maíz ( <i>Zea mays</i> ), la espinaca ( <i>Spinacia oleracea</i> ) y col ( <i>Brassica oleracea var. capitata</i> ).	.....65
Tabla Anexo 4.- Valores de prueba de homogeneidad de varianza mediante el estadístico Levene para la raíz del maíz ( <i>Zea mays</i> ), la espinaca ( <i>Spinacia oleracea</i> ) y col ( <i>Brassica oleracea var. capitata</i> ).	.....65
Tabla Anexo 5.- Comparación porcentual entre el control y los tratamientos en la estructura foliar del maíz ( <i>Zea mays</i> ).	.....66
Tabla Anexo 6.- Comparación porcentual entre el control y los tratamientos en la estructura foliar de la espinaca ( <i>Spinacia oleracea</i> ).	.....66
Tabla Anexo 7.- Comparación porcentual entre el control y los tratamientos en la estructura foliar de la col ( <i>Brassica oleracea var. capitata</i> ).	.....66
Tabla Anexo 8.- Comparación porcentual entre el control y los tratamientos en la raíz del maíz ( <i>Zea mays</i> ).	.....67

<p><b>Tabla Anexo 9.- Comparación porcentual entre el control y los tratamientos en la raíz de la espinaca (<i>Spinacia oleracea</i>).</b></p>	<p>.....67</p>
<p><b>Tabla Anexo 10.- Comparación del efecto progresivo de la urea y del plomo en tres variables de la estructura foliar entre el maíz (<i>Zea mays</i>), la espinaca (<i>Spinacia oleracea</i>) y col (<i>Brassica oleracea var. capitata</i>).</b></p>	<p>.....68</p>
<p><b>Figura Anexo 11.- Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>) entre la dosis de urea y el tiempo de acidez del maíz (<i>Zea mays</i>), la espinaca (<i>Spinacia oleracea</i>) y col (<i>Brassica oleracea var. capitata</i>).</b></p>	<p>.....69</p>
<p><b>Figura Anexo 12.- Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>) entre la dosis de urea y el pH del suelo del maíz (<i>Zea mays</i>), la espinaca (<i>Spinacia oleracea</i>) y col (<i>Brassica oleracea var. capitata</i>).</b></p>	<p>.....70</p>
<p><b>Figura Anexo 13.- Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>) entre el pH del suelo y el Pb foliar del maíz (<i>Zea mays</i>), la espinaca (<i>Spinacia oleracea</i>) y col (<i>Brassica oleracea var. capitata</i>).</b></p>	<p>.....71</p>

## RESUMEN

La intensificación agrícola ha generado el uso intensivo de plaguicidas y fertilizantes como la urea sin considerar los efectos negativos que estos pueden ocasionar, como la acidificación del suelo y el ingreso de plomo a la cadena trófica. El objetivo de la presente investigación fue determinar el efecto de la urea en la absorción de plomo en la estructura foliar de maíz (*Zea mays* L.), espinaca (*Spinacia oleracea* L.) y col (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.). Estas tres plantas fueron expuestas durante 93 días a cinco diferentes concentraciones de urea y a una concentración constante de plomo en forma de acetato de plomo. Por medio del análisis de la estructura foliar se determinó el efecto del plomo, dando como resultado un aumento en el peso seco del maíz y por el contrario en la espinaca (T<sub>4</sub>) una disminución del peso seco, así como el peso fresco y el área foliar. Por otro lado, un análisis a nivel radicular determinó los efectos de la concentración de plomo, dando como resultado una disminución en el peso fresco en el maíz (T<sub>4</sub>) y un aumento del mismo en la espinaca (T<sub>1</sub>); así como en el peso seco y la longitud. Se observó en los tratamientos con urea el incremento de los valores de clorofila en el maíz, espinaca y col; y la influencia en la acidificación del suelo. También se observó que la espinaca concentró mayor plomo foliar (T<sub>4</sub>).

**Palabras clave:** col, espinaca, maíz, plomo, urea

## ABSTRACT

Agricultural intensification has generated the intensive use of pesticides and fertilizers such as urea without considering the negative effects that these can cause, such as acidification of the soil and the entry of lead into the food chain. The research of the present investigation was to determine the effect of urea on the absorption of lead in the foliar structure of maize (*Zea mays* L.), spinach (*Spinacia oleracea* L.) and cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.). These three plants were exposed for 93 days to five different concentrations of urea and to a constant concentration of lead in the form of lead acetate. By means of analysis of the leaf structure, the effect of lead was determined, resulting in an increase in the dry weight of the corn and, on the contrary, in the spinach (T<sub>4</sub>) a decrease of the dry weight, as well as the fresh weight and the foliar area. On the other hand, a root level analysis determined the effects of lead concentration resulting in a decrease in fresh weight in corn (T<sub>4</sub>) and increase in spinach (T<sub>1</sub>) as well as dry weight and the length. The increase in chlorophyll values in corn, spinach and cabbage was observed in urea treatments; and the influence on soil acidification. It was also observed that spinach concentrated higher foliar lead (T<sub>4</sub>).

**Keywords:** cabbage, corn, lead, spinach, urea

## I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La demanda mundial de fertilizantes nitrogenados está en aumento, para el caso de la urea el consumo en el 2016 fue de 174,29 millones de t (Asociación Internacional de Fertilizantes [IFA], 2017). En el Perú, el volumen de importación de urea en el 2017 fue de 410 786,88 t (AGRODATAPERU, 2018).

La productividad de los cultivos está determinada por factores claves y uno de ellos son los fertilizantes nitrogenados como la urea (Campillo, Jobet y Undurraga, 2007). El uso intensivo de estos puede producir la acidificación o nitrificación de los suelos (Tong y Xu, 2012). Como consecuencia del aumento del uso de la urea, se generará una intensificación agrícola, la cual traerá consigo efectos negativos (FAO, 2014).

La existencia de metales pesados como el plomo en suelos agrícolas se debe principalmente al riego con aguas contaminadas (Méndez, González, Román y García, 2009); al empleo de pesticidas como el arseniato de plomo utilizado en nuestra agricultura (Iannacone, Alvariño y Paredes, 2009) hasta el 2013 donde se prohibió su uso (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2013); y, al depósito de partículas del aire contaminada por la actividad industrial y vehicular (Nolasco, 2001; Bellido, 2018).

La captación y la bioacumulación de metales pesados como el plomo en los cultivos están influenciadas por factores como el clima, las deposiciones atmosféricas, suelos con concentraciones de otros metales pesados, los fertilizantes, la naturaleza del suelo sobre el que se cultivan las hortalizas y las zonas agrícolas que tienen usos a largo plazo de las aguas residuales tratadas o sin tratar para riego (Sinha, Pandey, Gupta y Bhatt, 2005).

Fuentes antropogénicas como los fertilizantes pueden contribuir en la absorción de metales pesados en los cultivos mediante la modificación de las propiedades fisicoquímicas del suelo, como el pH, la materia orgánica y la biodisponibilidad de los metales pesados en suelo (Sharma, Agrawal y Marshall, 2008).

Según Yu-kui, Shi-ling, Fu-suo y Jian-bo (2009), el cultivo del maíz (*Zea mays* L.) absorbe elementos minerales y metales pesados debido al uso de fertilizantes nitrogenados. En el caso de la col (*Brassica oleracea* L.) es una planta con características hiperacumuladoras de metales pesados (Yanqunb, Yuana, Jianjunb, Haiyanb y Schvartz, 2005). También, la espinaca (*Spinacia oleracea* L.) tiene un alto potencial para acumular metales pesados (Kumara, Sanjeev, Dwivedia, Singha y Barmanb, 2013).

La absorción de metales pesados en las distintas partes de las plantas (raíz, hojas y fruto) es el primer paso para su acceso en la cadena alimenticia (Méndez et al., 2009). Por lo tanto, representa un peligro para la salud debido a los efectos negativos que estos pueden ocasionar (Salazar, Rodríguez, Nieto y Pignata, 2012).

En base a lo expuesto tenemos como pregunta principal ¿Cómo afecta el uso de urea en la absorción de plomo en la estructura foliar de maíz (*Z. mays*), espinaca (*S. oleracea*) y col (*B. oleracea* var. *capitata* L.)?, y como preguntas específicas, ¿Cuál de las especies vegetales absorbe mayor plomo en su estructura foliar?, ¿Cuáles son los efectos de la absorción de Pb en la raíz del maíz, espinaca y col? y ¿Cómo influye el fertilizante nitrogenado (urea) en la acidificación del suelo?.

## II. MARCO TEÓRICO

### 1. Bases teóricas

#### 1.1. *Metales pesados en la agricultura*

La presencia de metales pesados en el suelo y el agua tanto superficial como subterránea ha ido incrementando a niveles que en la actualidad son un peligro para los seres humanos, así como para las plantas y los animales. Entre los metales tóxicos se encuentran el plomo, mercurio, arsénico, cromo, cadmio y otros (Zhao et al., 2016). Las fuentes que aportan estos metales al suelo son las actividades geológicas naturales y las actividades antropogénicas (Pineda, 2004). En los suelos agrícolas las fuentes de metales pesados son por depósitos de partículas del aire contaminado por la actividad industrial y vehicular (Nolasco, 2001; Bellido, 2018), riego con aguas contaminadas (Méndez et al., 2009) y uso de plaguicidas (Iannacone et al., 2009).

Los alimentos cultivados en zonas agrícolas cercanas a vías de alto tránsito de vehículos como áreas industriales y mineras pueden contener altas concentraciones de metales pesados sobre todo en tubérculos, hortalizas y cereales (Oriundo y Robles, 2009). La agricultura urbana nos permite una seguridad alimentaria siempre y cuando se dé bajo condiciones seguras, y se practique adecuadamente; sino por el contrario puede representar un riesgo para la salud debido al paso de sustancias tóxicas, como los metales pesados (Olivares et al., 2013). Lima se encuentra dentro de las 10 ciudades que presenta agricultura urbana, la cual se lleva a cabo en distritos como Puente Piedra, Rímac, Carabayllo, Pachacamac, Lurín, Lurigancho, Chosica y Ate- Vitarte (FAO, 2015ab).

## 1.2. Urea

Los fertilizantes son sustancias sólidas que contiene elementos para mejorar la fertilidad del suelo, de aplicación directa o diluida en agua con el fin de incrementar el aprovechamiento de los cultivos (IFA, 2013). Los fertilizantes nitrogenados contienen nitrógeno en forma asimilable por lo que puede aplicarse al suelo o las hojas para conseguir el crecimiento y desarrollo óptimo de la planta (Sistema de Información de Precios y Abastecimiento del Sector Agropecuario [SIPSA], 2012). La urea es el fertilizante químico nitrogenado de mayor consumo e importancia en el mundo debido a su bajo costo, fácil almacenamiento, transporte y aplicación (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [ODEPA], 2012).

La urea posee 46 % de nitrógeno en su composición, el nitrógeno es un macronutriente, así como el potasio y el fósforo, que la planta requiere en grandes cantidades; sin embargo la disponibilidad de este elemento en el suelo es limitada. El porcentaje de nitrógeno inorgánico que es asimilable por la planta se encuentra por debajo del 10 % del nitrógeno total del suelo (Ciarlo y Palma, 2011). Por lo que el sector agrario se encuentra en la necesidad de usar fertilizantes nitrogenados como la urea para satisfacer la necesidad de los cultivos (SIPSA, 2012). Al aplicar la urea al suelo se hidroliza por una enzima llamada ureasa, y como resultado se forma carbonato de amonio ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Esta sal es inestable por lo que se descompone en anhídrido carbónico y amoníaco, este último puede volatizarse o ser absorbido por el suelo (Darwich, 2006).

La urea en el Perú es el fertilizante de mayor consumo, seguido de sulfato de amonio y nitrato de amonio, en el 2018 se importó 966 157 t de fertilizantes (MINAGRI, 2019). Debido a que el Perú no produce fertilizantes se necesita proveer del exterior, Rusia es

el mayor proveedor de urea, seguido de países como Argelia, Bielorrusia, Letonia, Finlandia, Lituania y China. El 2018 se importó un poco más de 257 001 t de urea y dentro de las empresas importadoras más representativas se encuentran Molinos & Cia. SA, Gavilón Perú SRL, Equilibra Perú SA, Ceres Perú SA, Yara Perú SRL e Inka Agri-Resources SAC (AGRODATA PERÚ, 2019ab).

### 1.3. *Plomo (Pb)*

El plomo es un metal que se encuentra dentro del grupo 14 de la tabla periódica, su punto de fusión es de 327,4 °C, tiene una densidad de 11,35 g•mL<sup>-1</sup>, es un sólido grisáceo poco soluble en agua, además posee dos estados de oxidación Pb (+4) y Pb (+2), siendo este último el más reactivo y común (Sagan, 2003). Este metal está presente en la corteza terrestre de forma natural; sin embargo, la actividad antropogénica ha logrado modificar la cantidad y la naturaleza de las diferentes especies de plomo en el suelo, y se le puede encontrar como un complejo de constituyentes inorgánicos, como ligandos orgánicos, como un ion metálico libre o adsorbido en la superficie de las partículas (Pourrut, Shahid, Dumat, Winterton y Pinelli, 2011).

El plomo es el metal de mayor interés toxicológico debido a que su presencia en el medio tiene una elevada persistencia y se encuentra en aumento por la actividad humana; además de que puede biomagnificarse a través de la cadena alimenticia, adicionalmente a concentraciones determinadas ocasionan daños al ambiente y puede mostrar efectos sinérgicos con otros metales (Smolders et al., 2015). De todo el plomo antropogénico acumulado en la superficie del suelo solo pequeñas cantidades son solubles y por ende disponible para la absorción de la planta (Kopittke et al., 2007).

Factores en el suelo como condiciones biológicas y microbianas, pH, mineralogía del suelo, condiciones redox, cantidad de plomo, especie de planta, niveles de cationes competidores, capacidad de intercambio catiónico, niveles de ligandos inorgánicos y orgánicos, pueden actuar de forma individual o en conjunto y así alterar el comportamiento del suelo y la tasa de absorción de plomo por parte de las plantas (Pourrut et al., 2011). El pH es uno de los principales agentes que controlan la disponibilidad del plomo para la planta, en pH bajos o ácidos la solubilidad del metal mejora por ende se encuentra disponible para ser absorbido por las raíces de las plantas (García, Barceló y Gunsé, 2007; Vega, Andrade y Covelo, 2010).

Se desconoce a nivel molecular como el plomo ingresa a través de las raíces, pero se sabe las vías por donde pueden ingresar, como lo son los canales iónicos (Wang et al., 2007). Sin embargo, se ha demostrado que la vía principal por donde ingresa a la raíz son los canales permeables de  $\text{Ca}^{2+}$  (Pourrut et al., 2008). La toxicidad del plomo en las plantas afecta en la germinación y el crecimiento, concentración y producción clorofila, nutrición mineral y reacciones enzimáticas, así como otros efectos fisiológicos. La intensidad de estos efectos está en función del tiempo de exposición, de la concentración de plomo utilizada en la evaluación de la exposición, de la etapa de desarrollo de la planta, y órgano estudiado (Pourrut et al., 2011).

Por otro lado, las plantas cuentan con mecanismos de evasión o desintoxicación contra la toxicidad del plomo como síntesis de osmolitos, secuestro de plomo en vacuolas por la formación de complejos, reducción de la absorción en la célula y la unión del plomo por fitoquitlatinas, glutatión y aminoácidos (Liu et al., 2009; Cao et al., 2015). La eficiencia de estos mecanismos va a determinar la sensibilidad o tolerancia de las

plantas, las que desarrollen mecanismos eficientes se caracterizan como hiperacumuladoras (Arshad et al., 2008). Las plantas hiperacumuladoras son ampliamente usadas para la fitorremediación; sin embargo, se tiene que reducir el uso de plantas que acumulen el plomo en la parte foliar para evitar que el plomo ingrese a la cadena alimenticia y pueda causar daños (Arshad et al., 2008; Bi et al., 2010).

La toxicidad del plomo en humanos incluso a bajos niveles se ha asociado con efectos neurológicos, inmunológicos, cardiovasculares, renales y/o reproductivos (Wang et al., 2003). Los niños pueden absorber plomo entre cuatro y cinco veces más que los adultos, asimismo se estima que se pierden 143 000 vidas por exposición al plomo, siendo una de las tasas con mayor mortalidad en países en desarrollo (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2014).

Según el boletín estadístico minero del Ministerio de Energía y Minas [MINEM] en el 2018, el Perú ocupó el tercer puesto en el ranking mundial de producción de plomo y el primer puesto en Latinoamérica con una producción de 21 615 TMF, el volumen exportado fue de 785 miles de t equivalente a 1 530 millones de dólares. A nivel nacional las principales regiones que producen plomo son Pasco, Junín y Lima, y en conjunto representan el 63,3 % de la producción. Entre las mineras que producen plomo se encuentra Sociedad Minera El Brocal S.A.A., Volcan Compañía Minera S.A.A., Compañía Minera Chungar S.A.C., Nexa Resources y El Porvenir S.A.C. (MINEM, 2019).

El área de vigilancia epidemiológica de riesgos ambientales del Ministerio de Salud [MINSa] en el 2016 notificó 428 casos por exposición e intoxicación de metales pesados de los cuales 224 casos que representa el 52 % del total fueron a causa del plomo y sus compuestos (MINSa, 2016). En el 2018 se notificaron 6 505 casos por exposición a

metales pesados y metaloides, registrándose una emergencia sanitaria en el mes de abril a causa de 3 212 casos. Entre los departamentos con mayor número de casos se encuentra en primer lugar Pasco, seguido de Callao, Junín y Lima. En lo que va del año 2019 (hasta marzo) se han notificado 251 casos y el 90 % de los casos notificados corresponden a niños entre 1 y 11 años (MINSA, 2019).

#### 1.4. *Maíz*

El maíz (*Z. mays*) es el cereal de mayor consumo y es cultivado en diferentes partes del mundo, integra la familia Poaceae, su color es a menudo amarillo o blanco, existen variedades de color negro, jaspeado y rojo (FAO, 1993). Alcanza su madurez fisiológica en un tiempo de tres a cinco meses aproximadamente, es sensible a la falta de agua, requiere para su crecimiento altas temperaturas entre 22 a 28 °C y es rico en proteínas, fibra y fósforo (López y Espinoza, 2011).

En el Perú el maíz amarillo duro es uno de los cultivos de mayor importancia a nivel nacional debido a que es un insumo para la preparación de alimentos balanceados para la industria ganaderas, avícola y porcícolas y por su alto valor nutricional (INIA, 2013). Sin embargo, no se abastece la demanda nacional por lo que es necesario importar de otros países como Estados Unidos, Brasil y Argentina, en el 2018 se importó 3 528 415 t (AGRODATA PERÚ, 2018).

Según el plan nacional de cultivos para la campaña agrícola 2018 – 2019 a través de la Dirección de Estadística Agraria (DEA) dio a conocer que en el 2017 se cosecharon 265 128 ha de maíz amarillo duro (es el tipo de maíz que se usó en esta investigación) a nivel nacional y llegaron a producir 1 249 600 t, dentro de las principales regiones productoras

se encuentra en primer lugar Ica con 223 834 t, seguido de Lima con 178 830 t y La Libertad con 138 086 t. En cuanto al rendimiento promedio mensual a nivel nacional fue de 4 713 kg·ha<sup>-1</sup> y el precio promedio nacional en chacra mensual fue de 0,94 soles·Kg<sup>-1</sup> (MINAGRI, 2018).

### 1.5. *Espinaca*

La espinaca (*S- oleracea*) integra la familia Amaranthaceae y es la hortaliza de mayor consumo en Europa debido a su alto contenido de hierro y a sus propiedades beneficiosas para el hombre (Pighín y Rossi, 2010). Esta planta tiene un ciclo de vida anual, se desarrolla a una temperatura óptima de 13 a 18 °C, pero tolera ligeramente las heladas, su siembra es de tipo directa, tolerante a la salinidad del suelo y es rica en vitaminas A, B12, C y hierro (Roberto et al., 2000).

En Perú la producción de espinaca es para el consumo del mercado nacional, el cultivar Viroflay es la variedad de mayor consumo y difusión en el mercado peruano, por sus cualidades post cosecha, la cual permite su transporte a larga distancia (Valenzuela, 2016).

Según el plan nacional de cultivos para la campaña agrícola 2018 – 2019 a través de la DEA dio a conocer que en el 2017 se cosecharon 1 202 ha de espinaca a nivel nacional y llegaron a producir 24 493 t; dentro de las principales regiones productoras se encuentra en primer lugar Junín con 14 418 t, seguido de Lima Metropolitana con 6 671 t y Arequipa con 1 198 t. En cuanto al rendimiento promedio mensual a nivel nacional fue de 20 383 kg·ha<sup>-1</sup> y el precio promedio nacional en chacra mensual fue de 1,12 soles·Kg<sup>-1</sup> (MINAGRI, 2018).

### 1.6. Col

La col (*B. oleracea* var. *capitata*) es una hortaliza que integra la familia Brassicaceae y su cultivo está extendido mundialmente (Otto et al., 2008). Posee una fenología bienal, en la fase reproductiva necesita el estímulo de temperaturas bajas, la fase de crecimiento vegetativo se da en condiciones climáticas tropicales y es la más importante para los productores (Pletsch, 2003). Además, se desarrolla a una temperatura óptima de 15 a 20 °C, su siembra es de tipo trasplante, tolerante a la salinidad del suelo y es rica en vitamina C, calcio, magnesio y fibra (Roberto et al., 2000).

En Perú, la producción de la col está destinada para el mercado interno, muy difundido en la costa central y tiene una gran aceptación en los diferentes sectores de la población por su valor nutricional y su bajo costo. La col verde lisa se produce más en comparación con la col rizada o morada, y existen cultivares como Brunswick, Gloria y Quintal (Nina, 2014).

Según el plan nacional de cultivos para la campaña agrícola 2018 – 2019 a través de la DEA dio a conocer que en el 2017 se cosecharon 2 298 ha de col a nivel nacional y llegaron a producir 33 171 t. Dentro de las principales regiones productoras se encuentra en primer lugar La Libertad con 6 479 t, seguido de Lima con 6 037 t y Lima Metropolitana con 4 976 t. En cuanto al rendimiento promedio mensual a nivel nacional fue de 14 434 kg·ha<sup>-1</sup> y el precio promedio nacional en chacra mensual fue de 0,79 soles·Kg<sup>-1</sup> (MINAGRI, 2018).

### 1.7. *Normativa Ambiental*

A nivel nacional se cuenta con Estándares de Calidad Ambiental [ECAs] para el agua destinada a riego de vegetales, en el caso del plomo el valor es de 0,05 mg•L<sup>-1</sup>. También hay ECAs para metales en suelos agrícolas, en el caso del plomo es valor es de 0,07 g•kg<sup>-1</sup>. La normativa peruana señala que los LMP para alimentos se rigen al Codex Alimentarius. Para el caso del plomo el valor para el maíz es de 0,05 ppm y para la col es de 0,3 ppm. Hay valores para hortalizas, sin embargo excluye a la espinaca.

### 2. Antecedentes

La fertilización nitrogenada tiene un impacto a largo plazo sobre la tasa de acidificación en un suelo típico de cultivo, esta tasa tiene una relación 0,01 unidades de pH por año (Ping et al., 2015). También se ha demostrado a través de la relación del ciclo del nitrógeno y la acidificación del suelo que la fertilización nitrogenada puede acidificar el suelo rápidamente y reducir la fertilidad (Helyar, 1976). Estos efectos ponen en cuestión la sostenibilidad de sistemas de cultivos con fertilizantes nitrogenados (Noble, Suzuki, Soda, Ruaysoongnern y Berthelsen, 2008).

En suelos subtropicales la aplicación de sulfato de amonio generó una mayor nitrificación que la urea, por lo tanto el suelo se acidificó significativamente (Zhao y Xing, 2009). Por otro lado, en suelos al sur de China la adición de urea estimuló el aumento de la población AOB (bacterias oxidantes de amoníaco) y por lo tanto aceleró la nitrificación y la acidificación del suelo, mientras que la adición de sulfato de amonio ocasionó lo opuesto (Tong y Xu, 2012).

La biodisponibilidad de metales pesados en suelos contaminados se incrementa cuando se incorporan acidificantes como fertilizantes, ácidos orgánicos e inorgánicos (Bhargava et al., 2012). En la planta *Solanum elaeagnifolium* Cav., se observó que la acumulación de plomo ocurrió de manera creciente de la raíz a la hoja; por lo tanto, existe una correlación entre la dosis nitrogenada y la concentración de Pb (Calzada et al., 2009).

En las plantas la absorción de los metales pesados es principalmente el primer paso para el ingreso de éstos en la cadena alimenticia (Méndez et al., 2009). La existencia de metales pesados en el sistema suelo-vegetal pueden causar un daño potencial a la salud humana (Liu et al., 2013).

Existen familias de plantas con características hiperacumuladoras de metales pesados como Brassicaceae y Fabaceae (Yanqunb et al., 2005). La espinaca (*S. oleracea*) tiene un alto potencial para acumular metales pesados y una mayor translocación para el plomo comparado con las otras especies vegetales (Kumara et al., 2013). También la alverja y el maíz poseen una alta capacidad de fitoextracción para el Pb (Saadia y Ashraf, 2013).

En ciudades industriales y urbanas en el Reino de Arabia Saudita se determinó que la concentración de metales pesados en los vegetales tiene riesgos potenciales para la salud de los consumidores de alimentos de producción local (Ali y Al-Qahtani, 2012). Existen estudios limitados sobre concentración y transporte de metales pesados en vegetales y la exposición humana a metales pesados bioaccesibles en el suelo (Yuan et al., 2015).

### III. OBJETIVOS

#### 1. Objetivo principal

- Determinar el efecto de la urea en la absorción de plomo en la estructura foliar del maíz (*Z. mays*), espinaca (*S. oleracea*) y col (*B. oleracea* var. *capitata*).

#### 2. Objetivos específicos

- Determinar la especie vegetal (espinaca, maíz y col) que absorbe mayor cantidad de plomo en sus hojas.
- Determinar los efectos de la absorción de plomo en la raíz del maíz (*Z. mays*), espinaca (*S. oleracea*) y col (*B. oleracea* var. *capitata*).
- Determinar la influencia de la urea en la acidificación del suelo.

#### IV. METODOLOGÍA

##### 1. Lugar de estudio y sustrato

El estudio se realizó en el invernadero de Ingeniería Ambiental de la Universidad Científica del Sur (UCSUR), Lima, Perú. Se preparó un total de 112,5 kg de sustrato de invernadero, cuyas características fueron de: 40 % musgo, 30 % tierra de chacra, 10 % arena gruesa, 10 % compost y 10 % guano de caballo. Todos los insumos a excepción de la tierra de chacra fueron adquiridos en Vivero “Los Inkas” en el distrito de Santiago de Surco, Lima, Perú.

Para la selección de tierra de chacra se analizaron dos muestras, una perteneciente al distrito de Huachipa y otra al distrito de Lurín, Lima, Perú (Tabla 1), en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF) de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Lima, Perú. La que se eligió para el sustrato fue la del distrito de Lurín debido a que la concentración de plomo se encontraba por debajo del Estándar de Calidad Ambiental – ECA del Perú para Suelo Agrícola ( $0,07 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

**Tabla 1.-** Análisis de la tierra de chacra para la selección y preparación del sustrato de invernadero.

Muestra	Parámetros									
	pH (1:1)	CE <sub>(1:1)</sub> dS/m	CaCO <sub>3</sub> %	M.O. %	P ppm	K ppm	Al <sup>3+</sup> +H <sup>+</sup> meq/100	Pb g•kg <sup>-1</sup>	C.C %	N %
Tierra de Chacra (Lurín)	8,40	2,45	2,30	2,59	146	318	0	0,026	24,8	0,15
Tierra de Chacra (Huachipa)	7,54	1,14	0,50	0,77	29	139	0	0,12	18,1	0,07

(pH) Potencial de hidrógeno; (CE) Conductividad eléctrica; (CaCO<sub>3</sub>) Carbonato de calcio; (M.O.) Materia orgánica; (P) Fósforo; (K) Potasio; (Al<sup>3+</sup>+H<sup>+</sup>) Acidez intercambiable; (Pb) Plomo; (C.C.) Capacidad de campo; (N) Nitrógeno.

## 2. Material vegetal y sus condiciones de cultivo

El material vegetal que se utilizó para el presente experimento fueron semillas de espinaca (*S. oleracea*) y col (*B. oleracea* var. *capitata*) adquiridas en el vivero de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Lima, Perú. Las semillas de maíz (*Z. mays*) se adquirieron del Programa del Maíz de la UNALM, Lima, Perú. El cultivar para el maíz fue Indurata, para la espinaca el cultivar fue Viroflay y para la col el cultivar fue Brunswick.

Se estableció un diseño de bloques completamente aleatorizados con cinco tratamientos (Tabla 2) con tres repeticiones para cada planta, lo que hace un total de quince unidades experimentales por planta. Esto quiere decir que se tuvo 15 unidades experimentales con el cultivo del maíz, quince unidades experimentales con el cultivo de la espinaca y 15 unidades experimentales con el cultivo de la col, sumando en total 45 unidades experimentales.

El sustrato de invernadero se mezcló con la respectiva concentración de plomo (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> suelo) en un envase de plástico. El contaminante que se utilizó fue el acetato de plomo, y las dosis de urea según corresponda (Tabla 2). La urea que se utilizó fue adquirida en el Vivero “Los Inkas” en el distrito de Santiago de Surco, Lima, Perú.

Por consiguiente, se dejó estabilizar el suelo en las macetas por siete días para luego proceder a sembrar las semillas. La unidad experimental fue un envase de plástico de 15 L de capacidad con 2,5 kg de sustrato de invernadero; las semillas se sembraron directamente en el suelo a excepción de la col que se trasplantó luego de dos semanas de germinación. En cada maceta se sembró tres semillas y al cabo de tres semanas de germinación se procedió a dejar una planta por maceta. El crecimiento, así como el

desarrollo de las plantas fueron bajo condiciones de invernadero, se recolectaron datos temperatura y humedad relativa de la estación meteorológica del SENAMHI más cercana ubicada en el distrito La Molina, Lima, Perú.

**Tabla 2.-** Tratamientos planteados en la investigación para evaluar el efecto de la urea en la absorción de plomo.

Cultivos: Maíz ( <i>Zea mays</i> ), espinaca ( <i>Spinacia oleracea</i> ) y col ( <i>Brassica oleracea</i> var. <i>capitata</i> )		
Tratamiento	Nivel de aplicación de Urea (urea•kg <sup>-1</sup> de suelo)	Nivel de aplicación de Plomo (Pb•kg <sup>-1</sup> de suelo)
Control	0 g	0 g (*)
T <sub>1</sub>	0 g	0,5 g
T <sub>2</sub>	0,5 g	0,5 g
T <sub>3</sub>	1,0 g	0,5 g
T <sub>4</sub>	1,5 g	0,5 g

(T1) Tratamiento uno; (T2) Tratamiento dos; (T3) Tratamiento tres; (T4) Tratamiento cuatro; (\*) se considera 0 g debido a que se hace referencia a la aplicación de acetato de plomo al suelo y no al Pb (0,026) se encontraba por debajo del Estándar de Calidad Ambiental – ECA del Perú para Suelo Agrícola (0,07 g•kg<sup>-1</sup>).que forma parte de la composición del suelo de chacra.

Se procedió al riego de las plantas desde su siembra hasta una semana antes de la cosecha con agua embotellada. El volumen del agua de riego por maceta fue lo suficiente para que se aproxime a la humedad de capacidad de campo, con lo cual se evitó el lixiviado del exceso de agua, y por tanto una posible pérdida de nitrógeno, plomo u otros nutrientes del suelo. Se regó dos veces por semana, el primer riego fue un volumen de 1000 mL y luego se regó con un volumen entre 200 y 500 mL según la necesidad de cada planta (Roberto et al., 2000). En total se regó a cada planta de maíz con 7600 mL, de espinaca con 6800 mL y de col con 5800 mL.

### 3. Medición de pH

Durante el desarrollo y crecimiento de las plantas se evaluó el pH del suelo con un potenciómetro de la marca AAMS Ibérica (relación 1:1 suelo:agua) cada siete días para determinar su comportamiento (Collins et al., 1970).

### 4. Mediciones biométricas

Las mediciones se hicieron al final de la investigación, al momento de la cosecha a los 93 días, para el maíz, espinaca y col, sin considerar sus diferentes periodos de crecimiento porque se tomó como criterio un mismo tiempo de exposición a la urea y Pb.

En la planta, para determinar el peso fresco y peso seco se utilizó una balanza electrónica Ohaus SPJ6001 (sensibilidad de 0,1 g), para el porcentaje de la masa seca se obtuvo de la relación peso seco entre peso fresco multiplicado por 100 (estos datos fueron proporcionados por el laboratorio de la UNALM). Para determinar la altura de la planta se utilizó una cinta métrica (sensibilidad de 1 mm), en el maíz se consideró desde el ras del suelo hasta la hoja bandera (es la última hoja que emerge del tallo), en la espinaca y la col se consideró desde el ras del suelo hasta la hoja más alta.

Para determinar la clorofila se utilizó un medidor portátil de clorofila SPAD-502, donde se tomaron tres medidas entre el nervio principal y el borde de la hoja central de cada planta (Hurtado et al., 2017; Yllanes, Vélez y Lozano, 2014), para obtener un dato promedio de clorofila en unidades SPAD (“Soil Plant Analysis. Development”) (Valor SPAD: valor del índice de clorofila y que presenta una correlación con la densidad de la clorofila). Para determinar el área foliar se usó el programa ImageJ, Versión 1.50i, que

permite el procesamiento de las imágenes digitales y es de dominio público, para el cual se tomaron fotografías de todas las hojas de cada planta antes de ser enviadas al laboratorio.

En las raíces, para determinar el peso seco y fresco se utilizó una balanza analítica. El porcentaje de la masa seca se obtuvo de la relación peso seco entre peso fresco multiplicado por 100. Para determinar la longitud de la raíz se utilizó una cinta métrica, se consideró desde el ras del suelo hasta la raíz más larga.

#### 5. Medición de plomo y nitrógeno en la estructura foliar

La parte aérea de cada planta se colocó en bolsas de papel para posteriormente llevarlas al LASPAF de la UNALM, Lima, Perú, en el cual se determinó la concentración de plomo y nitrógeno en la estructura foliar.

La lectura o medición de la concentración del elemento plomo se realizó en un Espectrofotómetro de Absorción Atómica Perkin Elmer modelo AAnalyst 200, empleando una longitud de onda de 283,3 nm. El análisis del tejido vegetal para la determinación de nitrógeno total se realizó con el método descrito por Kjeldah (1883), el cual se fundamenta en transformar toda la fracción orgánica del nitrógeno (proteínas, aminoácidos) en sulfato de amonio, y que puede ser destilado, obteniéndose así el nitrógeno contenido en la muestra de la hoja.

#### 6. Análisis de datos

Los datos fueron analizados usando el programa estadístico SPSS, Versión 24,00. Las diferencias entre el control y los tratamientos, así como la relación entre los parámetros

en las plantas fueron analizados mediante el Análisis de Varianza (ANOVA), con una confianza del 95 %. Adicionalmente se usó la prueba no paramétrica de Kruskal – Wallis para aquellas variables que no reunieron todos los requisitos (normalidad y homogeneidad de varianza). Luego se realizó la prueba de Tukey para determinar las diferencias significativas para cada uno de los parámetros. También se determinó la concentración máxima donde no se observan efectos negativos en comparación con el control - NOEC y la concentración mínima donde se observan efectos negativos en comparación con el control – LOEC. Los efectos negativos para LOEC y NOEC hacen referencia a cualquier cambio de aumento o reducción para cada una de las variables evaluadas. Además, para NOEC y LOEC por conveniencia se usaron los valores estadísticamente diferentes más altos en relación al control en el caso de observarse una relación no lineal.

También se analizó la relación de la dosis de urea entre el tiempo de acidez y el pH de suelo, así como la relación del pH del suelo entre el Pb foliar mediante la correlación de Pearson, con una confianza del 95 %.

#### 7. Límite máximo permisible (LMP) de plomo en alimentos

Los datos obtenidos del LASPAF de la UNALM, Lima, Perú en cuanto a la concentración de plomo en la estructura foliar de la espinaca, maíz y col fueron comparados con los LMP del Codex Alimentarius y otros países (Ministerio de Industria, Comercio y Turismo [MINCOTUR], 2017). El Codex Alimentarius es la normatividad que rige en la legislación peruana debido a que no contamos con LMP para alimentos hasta la actualidad.

## 8. Aspectos éticos

Se declara que se cumplió con toda la normatividad vigente nacional e internacional ética durante la presente investigación (Santos Silva et al., 2015; Costello et al., 2016).

El Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina se encuentra acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL) con registro N° LE-010, el cual nos asegura resultados confiables y al mismo tiempo la disposición final adecuada para el material vegetal.

La Universidad Científica del Sur cuenta con un Manual para el manejo y eliminación para una adecuada gestión de contaminantes químicos y biológicos (CLCN-004-V1 del 2017), el cual nos asegura el manejo adecuado de materiales y residuos tóxicos y/o peligrosos, así como su adecuada disposición final en sus instalaciones como laboratorios e invernadero. Asimismo, se cumplió con el artículo N° 23 y 24 del Reglamento de Investigación y el procedimiento N° 5 “Autorización del uso de bienes de la universidad” de las Normas y Procedimientos de los Trabajos de Investigación para la Obtención de Títulos Profesionales y Grados Académicos.

## V. RESULTADOS

Se evaluaron 15 unidades experimentales con el cultivo del maíz, 15 unidades experimentales con el cultivo de la espinaca y nueve unidades experimentales con el cultivo de la col, debido que en la tercera semana se murieron los cultivos del T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>, sumando en total 39 unidades experimentales, las cuales crecieron y se desarrollaron durante 93 días bajo los siguientes parámetros de temperatura y humedad (Tabla 3).

**Tabla 3.-** Parámetros de temperatura y humedad de la estación meteorológica Von Humboldt del SENAMHI, La Molina, Lima, Perú (05 de junio - 31 de agosto, 2017).

Parámetros		Meses		
		Junio	Julio	Agosto
Temperatura (°C)	Promedio	17,49	16,76	15,70
	Máxima	27,90	27,90	27,90
	Mínima	12,80	12,00	11,20
Humedad (%)	Promedio	86,66	78,53	81,63
	Máxima	86,83	83,29	86,13
	Mínima	75,46	74,08	76,79

### 1. Maíz

En el maíz no se evidenciaron cambios significativos entre los tratamientos para Pb foliar, N foliar y materia seca (Tabla 4).

Para la clorofila el T<sub>1</sub> fue 21,13 % mayor que el control, el T<sub>2</sub> fue 101,82 % mayor que el control, el T<sub>3</sub> fue 84,97 % mayor que el control y el T<sub>4</sub> fue 80 % mayor que el control. Los tratamientos donde se aplicó urea (T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>) tuvieron los valores más altos de SPAD en comparación a los tratamientos donde no se aplicó urea (control y T<sub>1</sub>). Los valores para NOEC y LOEC fueron T<sub>1</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0 g urea•kg<sup>-1</sup>) y T<sub>2</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0,5 g urea•kg<sup>-1</sup>). Para el peso fresco el T<sub>1</sub> fue 17,5 % mayor que el control, el T<sub>2</sub> fue 57,29 % mayor que el control, el T<sub>3</sub> fue 51,22 % mayor que el control y el T<sub>4</sub> fue

30,16 % mayor que el control. Los valores para NOEC y LOEC fueron T<sub>1</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0 g urea•kg<sup>-1</sup>) y T<sub>2</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0,5 g urea•kg<sup>-1</sup>).

Para el peso seco el T<sub>1</sub> fue 69,4 % mayor que el control, el T<sub>2</sub> fue 72,04 % mayor que el control, el T<sub>3</sub> fue 63,54 % mayor que el control y el T<sub>4</sub> fue 40,85 % mayor que el control. El valor de NOEC fue T<sub>4</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1,5 g urea•kg<sup>-1</sup>) y de LOEC no se determinó.

Para la altura el T<sub>1</sub> fue 10,44 % menor que el control, el T<sub>2</sub> fue 20,86 % mayor que el control, el T<sub>3</sub> fue 12,73 % menor que el control y el T<sub>4</sub> fue 24,18 % menor que el control. El valor de NOEC no se determinó y el valor de LOEC fue T<sub>1</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0 g urea•kg<sup>-1</sup>).

Para el área foliar el T<sub>1</sub> fue 49,66 % mayor que el control, el T<sub>2</sub> fue 48,17 % mayor que el control, el T<sub>3</sub> fue 60,21 % mayor que el control y el T<sub>4</sub> fue 2,55 % menor que el control. El valor de NOEC fue T<sub>4</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1,5 g urea•kg<sup>-1</sup>) y de LOEC no se determinó.

## 2. Espinaca

En la espinaca no se evidenciaron cambios significativos entre los tratamientos para N foliar y altura (Tabla 5).

Para el Pb foliar el T<sub>1</sub> fue 53,6 % mayor que el control, el T<sub>2</sub> fue 105,79 % mayor que el control, el T<sub>3</sub> fue 135,13 % mayor que el control y el T<sub>4</sub> fue 260,68 % mayor que el control. Los tratamientos donde se aplicó urea tuvieron los valores más altos en comparación con los tratamientos donde no se aplicó urea. Los valores para NOEC y

LOEC fueron T<sub>3</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1 g urea•kg<sup>-1</sup>) y T<sub>4</sub> (1,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0,5 g urea•kg<sup>-1</sup>).

Para la clorofila el T<sub>1</sub> fue 21,6 % menor que el control, el T<sub>2</sub> fue 36,31 % mayor que el control, el T<sub>3</sub> fue 9,08 % mayor que el control y el T<sub>4</sub> fue 9,29 % menor que el control. El valor de NOEC fue T<sub>4</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1,5 g urea•kg<sup>-1</sup>) y de LOEC no se determinó.

Para el peso fresco el T<sub>1</sub> fue 8,33 % mayor que el control, el T<sub>2</sub> fue 53,17 % mayor que el control, el T<sub>3</sub> fue 46,24 % menor que el control y el T<sub>4</sub> fue 61,63 % menor que el control. Los valores para NOEC y LOEC fueron T<sub>3</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1 g urea•kg<sup>-1</sup>) y T<sub>4</sub> (1,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0,5 g urea•kg<sup>-1</sup>).

Para el peso seco el T<sub>1</sub> fue 16,08 % menor que el control, el T<sub>2</sub> fue 38,43 % mayor que el control, el T<sub>3</sub> fue 56,75 % menor que el control y el T<sub>4</sub> fue 60,53 % menor que el control. El valor de NOEC fue T<sub>4</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1,5 g urea•kg<sup>-1</sup>) y de LOEC no se determinó.

Para la materia seca el T<sub>1</sub> fue 361,94 % mayor que el control, el T<sub>2</sub> fue 196,48 % mayor que el control, el T<sub>3</sub> fue 106,83 % mayor que el control y el T<sub>4</sub> fue 44,78 % mayor que el control. El valor de NOEC fue T<sub>4</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1,5 g urea•kg<sup>-1</sup>) y de LOEC no se determinó.

Para el área foliar el T<sub>1</sub> fue 40,12 % mayor que el control, el T<sub>2</sub> fue 29,35 % mayor que el control, el T<sub>3</sub> fue 19,57 % menor que el control y el T<sub>4</sub> fue 57,80 % menor que el control. El valor de NOEC fue T<sub>4</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1,5 g urea•kg<sup>-1</sup>) y de LOEC no se determinó.

**Tabla 4.-** Efecto progresivo de la urea y del plomo en ocho variables de la estructura foliar del maíz (*Zea mays*).

CONCEN-TRACIONES (g Pb·kg <sup>-1</sup> de suelo)	TRATA-MIENTO	PB FOLIAR (ppm)	N FOLIAR (%)	CLORO-FILA (SPAD)	PESO FRESCO (g)	PESO SECO (g)	MATERIA SECA (%)	ALTURA (cm)	ÁREA FOLIAR (cm <sup>2</sup> )								
										p.	p.	p.	p.	p.	p.	p.	p.
0	Control	2,90 ±0,53	a	1,23 ±0,19	a	23,62 ±1,17	b	78,55 ±4,48	c	13,66 ±0,19	b	91,33 ±2,73	a	131,00 ±7,33	a	4856,23 ±650	b
0,5	T <sub>1</sub>	7,34 ±1,68	a	1,75 ±0,24	a	28,61 ±1,65	b	92,30 ±4,11	bc	23,14 ±3,31	a	91,67 ±10,87	a	117,33 ±8,08	a	7263,08 ±668	a
0,5	T <sub>2</sub>	5,73 ±0,98	a	2,39 ±0,21	a	47,67 ±2,37	a	123,55 ±3,39	a	23,50 ±1,34	a	59,00 ±8,02	a	158,33 ±14,19	a	7195,30 ±394	a
0,5	T <sub>3</sub>	6,43 ±1,85	a	2,97 ±0,12	a	43,69 ±0,52	a	118,78 ±5,25	a	22,34 ±1,18	a	80,33 ±11,20	a	114,33 ±6,96	c	7780,03 ±862	a
0,5	T <sub>4</sub>	5,17 ±0,78	a	2,87 ±0,90	a	42,48 ±1,97	a	102,24 ±4,39	b	19,24 ±0,81	ab	62,67 ±5,67	a	99,33 ±4,10	d	4732,65 ± 638	b
	F	1,72	2,87	39,56	22,13	5,71	0,01*	120,7	4,85								
	P.	0,22	0,08	0,0	0,0	0,01	>0,05	0,0	0,02								
	NOEC	T <sub>4</sub> **	T <sub>4</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>4</sub> **	T <sub>4</sub>	ND	T <sub>4</sub> **								
	LOEC	ND	ND	T <sub>3</sub>	T <sub>3</sub>	ND	ND	T <sub>1</sub>	ND								

(Pb) Plomo; (N) Nitrógeno; (F) Estadístico de Fisher; (\*) Se usó el estadístico del Test de Kruskal Wallis porque los datos no cumplieron con la prueba de normalidad; SPAD: valor del índice de clorofila; (p.) Nivel de significancia; (NOEC) Concentración máxima hasta donde no se observan efectos negativos respecto al control; (LOEC) Concentración mínima donde se observan efectos negativos respecto al control; (±) Error estándar; (ND) No determinado; (\*\*) Para NOEC y LOEC por conveniencia se usaron los valores estadísticamente diferentes más altos en relación al control en el caso de observarse una relación no lineal; Letras minúsculas iguales en una misma columna según la prueba de Tukey indican que los promedios son estadísticamente igual (p>0,05)

**Tabla 5.-** Efecto progresivo de la urea y del plomo en ocho variables de la estructura foliar de la espinaca (*Spinacia oleracea*).

CONCEN-TRACIONES (g Pb·kg <sup>-1</sup> de suelo)	TRATA-MIENTO	PB FOLIAR (ppm)	N FOLIAR (%)	CLORO-FILA (SPAD)	PESO FRESCO (g)	PESO SECO (g)	MATERIA SECA (%)	ALTURA (cm)	ÁREA FOLIAR (cm <sup>2</sup> )								
										p.	p.	p.	p.	p.	p.	p.	p.
0	Control	5,01 ±1,17	b	3,31 ±0,43	a	46,49 ±3,12	bc	118,77 ±13,66	bc	12,44 ±3,65	ab	9,67 ±1,45	d	42,00 ±4,93	a	2910,13 ±420	ab
0,5	T <sub>1</sub>	7,68 ±2,85	b	3,84 ±0,69	a	36,45 ±2,40	c	128,66 ±14,67	ab	10,44 ±1,72	ab	44,67 ±2,60	a	37,67 ±1,86	a	4077,55 ±599	a
0,5	T <sub>2</sub>	10,31 ±0,88	ab	4,78 ±0,15	a	63,37 ±3,32	a	181,92 ±13,30	a	17,22 ±1,78	a	28,00 ±2,87	b	43,67 ±2,91	a	3764,13 ±120	a
0,5	T <sub>3</sub>	11,78 ±0,82	ab	4,76 ±0,43	a	50,71 ±3,44	b	63,85 ±1,45	cd	5,38 ±0,52	b	20,00 ±0,58	bc	32,33 ±0,88	a	2340,59 ±302	ab
0,5	T <sub>4</sub>	18,07 ±6,66	a	4,81 ±0,03	a	42,17 ±2,00	bc	45,57 ±21,87	d	4,91 ±2,00	b	14,00 ±2,52	cd	31,00 ±3,51	a	1228,18 ±535	b
	F	0,1*	0,27*	12,18	13,99	5,13	4,95	3,22	7,01								
	P.	<0,05	>0,05	0,0	0,0	0,02	0,03	0,06	0,0								
	NOEC	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub>								
	LOEC	T <sub>4</sub>	ND	ND	T <sub>4</sub>	ND	ND	ND	ND								

(Pb) Plomo; (N) Nitrógeno; (F) Estadístico de Fisher; (\*) Se usó el estadístico del Test de Kruskal Wallis porque los datos no cumplieron con la prueba de normalidad; SPAD: valor del índice de clorofila; (p.) Nivel de significancia; (NOEC) Concentración máxima hasta donde no se observan efectos negativos respecto al control; (LOEC) Concentración mínima donde se observan efectos negativos respecto al control; (±) Error estándar; (ND) No determinado; (\*\*) Para NOEC y LOEC por conveniencia se usaron los valores estadísticamente diferentes más altos en relación al control en el caso de observarse una relación no lineal; Letras minúsculas iguales en una misma columna según la prueba de Tukey indican que los promedios son estadísticamente igual (p>0,05).

### 3. Col

En la col no se evidenciaron cambios significativos entre los tratamientos para Pb foliar, peso fresco, peso seco, materia seca, altura y área foliar (Tabla 6).

Para el nitrógeno foliar el T<sub>1</sub> fue 5,78 % mayor que el control, el T<sub>2</sub> fue 13.72 % menor que el control. Los valores para NOEC Y LOEC fue T<sub>1</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0 g urea•kg<sup>-1</sup>) y T<sub>2</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0,5 g urea•kg<sup>-1</sup>).

Para la clorofila el T<sub>1</sub> fue 0,88 % mayor que el control, el T<sub>2</sub> fue 23.78 % mayor que el control. Los valores para NOEC Y LOEC fue T<sub>1</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0 g urea•kg<sup>-1</sup>) y T<sub>2</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0,5 g urea•kg<sup>-1</sup>).

### 4. Comparación Pb foliar, N foliar y clorofila

Se compararon los valores de Pb foliar, N foliar y clorofila de forma independiente y por separado para cada tratamiento entre las tres especies de plantas (maíz, espinaca y col):

Se observó que en el control, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub> no se evidenciaron diferencias entre los valores de Pb foliar, N foliar y clorofila. En el T<sub>1</sub> se observó que la espinaca tiene 128,6 % y la col tiene 85,1 % mayor concentración de nitrógeno foliar comparado con el maíz. La col tiene 35,3 % mayor de clorofila comparado con la espinaca y 84,2 % mayor comparado con el maíz. En el T<sub>2</sub> se observó que la espinaca tiene un valor 79,9 % mayor de Pb foliar comparado con el maíz y 101 % mayor comparado con la col; para el N foliar la espinaca tiene 154,3 % mayor comparado con el maíz y 95,9 % mayor comparado con la col, y para la clorofila la espinaca tiene un valor 59,4 % mayor comparado con el maíz y 9,5 % mayor comparado con la col. Además se observa en la espinaca que una mayor presencia de Pb foliar y N foliar (Tabla 7: Figuras Anexos).

**Tabla 6.- Efecto progresivo de la urea y del plomo en ocho variables de la estructura foliar de la col (*Brassica oleracea* var. *capitata*).**

CONCENTRACIONES TRACIONES (g Pb*kg <sup>-1</sup> de suelo)	TRATA- MIENTO	PB FOLIAR (ppm)	N FOLIAR (%)	P.	CLOROFILA (SPAD)	P.	PESO FRESCO (g)	P.	PESO SECO (g)	P.	MATERIA SECA (%)	P.	ALTURA (cm)	P.	ÁREA FOLIAR (cm <sup>2</sup> )	P.
0	Control	5,25 ±1,37	2,77 ±0,19	a	48,99 ±0,93	b	138,99 ±7,03	a	15,59 ±1,40	a	6,33 ±0,33	a	36,67 ±0,88	a	4045,16 ±137	a
0,5	T <sub>1</sub>	6,54 ±0,69	2,93 ±0,31	a	49,42 ±0,78	b	150,53 ±28,28	a	16,34 ±1,74	a	9,67 ±4,06	a	33,00 ±1,16	a	4296,64 ±566	a
0,5	T <sub>2</sub>	5,13 ±0,57	2,39 ±0,21	b	60,64 ±1,55	a	202,20 ±6,43	a	19,84 ±0,82	a	7,33 ±0,88	a	38,33 ±2,33	a	5283,28 ±186	a
	F	0,68	11,76		0,07*		3,81		5,13		0,97		2,96		3,43	
	p.	0,54	0,01		<0,05		0,09		0,02		0,43		0,13		0,10	
	NOEC	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>		T <sub>1</sub>		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>	
	LOEC	ND	T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		ND		ND		ND		ND		ND	

(Pb) Plomo; (N) Nitrógeno; (F) Estadístico de Fisher; (\*) Se usó el estadístico del Test de Kruskal Wallis porque los datos no cumplieron con la prueba de normalidad; SPAD: valor del índice de clorofila; (p.) Nivel de significancia; (NOEC) Concentración máxima hasta donde no se observan efectos negativos respecto al control; (LOEC) Concentración mínima donde se observan efectos negativos respecto al control; (±) Error estándar; (ND) No determinado; (\*\*) Para NOEC y LOEC por conveniencia se usaron los valores estadísticamente diferentes más altos en relación al control en el caso de observarse una relación no lineal; Letras minúsculas iguales en una misma columna según la prueba de Tukey indican que los promedios son estadísticamente igual (p>0,05)}

**Tabla 7.-** Comparación del efecto progresivo de la urea y del plomo en tres variables de la estructura foliar entre el maíz (*Zea mays*), la espinaca (*Spinacia oleracea*) y col (*Brassica oleracea* var. *capitata*).

CONCENTRACIONES (g Pb•kg <sup>-1</sup> de suelo)	TRATAMIENTO	ESPECIE DE PLANTA	PB FOLIAR (ppm)		N FOLIAR (%)		CLOROFILA (SPAD)	
			Pb	Urea	P.	N FOLIAR (%)	P.	CLOROFILA (SPAD)
0	Control	Maíz	2,90 ±0,51	a	2,30 ±1,25	a	30,53 ±5,83	a
		Espinaca	5,01 ±1,69	a	3,31 ±0,43	a	46,49 ±3,13	a
		Col	5,25 ±1,37	a	2,63 ±0,85	a	45,31 ±3,48	a
0,5	T <sub>1</sub>	p.	0,24		0,30		0,19	
		Maíz	7,33 ±1,68	a	1,68 ±0,14	b	26,78 ±3,03	b
		Espinaca	7,68 ±2,85	a	3,84 ±0,69	a	36,45 ±2,40	b
0,5	T <sub>2</sub>	Col	6,54 ±0,69	a	3,11 ±0,26	ab	49,33 ±0,78	a
		p.	0,88		0,05		0,03	
		Maíz	5,73 ±0,98	b	1,88 ±0,30	b	39,75 ±6,67	b
0,5	T <sub>3</sub>	Espinaca	10,31 ±0,88	a	4,78 ±0,15	a	63,37 ±3,32	a
		Col	5,13 ±0,57	b	2,44 ±0,15	b	57,88 ±2,98	ab
		p.	0,05		0,05		0,04	
0,5	t <sub>4</sub>	Maíz	6,43 ±1,85	a	2,83 ±0,03	a	45,79 ±2,47	a
		Espinaca	11,78 ±0,82	a	4,76 ±0,43	a	50,71 ±3,44	a
		p.	0,10		0,10		0,20	
0,5	t <sub>4</sub>	Maíz	5,17 ±0,78	a	3,03 ±0,90	a	44,41 ±0,27	a
		Espinaca	18,07 ±6,66	a	4,82 ±0,06	a	42,17 ±3,47	a
		p.	0,20		0,20		1,00	

(Pb) Plomo; (N) Nitrógeno; (p.) Nivel de significancia; (±) Error estándar; Se comparó en forma independiente cada tratamiento entre las tres especies de plantas; Letras minúsculas iguales en una misma columna según la prueba de Tukey indican que los promedios son estadísticamente igual (p>0,05).

## 5. Raíz del maíz

En la raíz del maíz no se evidenciaron cambios significativos entre los tratamientos para peso seco, materia seca y longitud (Tabla 8).

Para el peso fresco el T<sub>1</sub> fue 4,25 % menor que el control, el T<sub>2</sub> fue 31,93 % menor que el control, el T<sub>3</sub> fue 27,67 % mayor que el control y el T<sub>4</sub> fue 53,19 % menor que el control. Los valores para NOEC y LOEC fueron T<sub>3</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1 g urea•kg<sup>-1</sup>) y T<sub>4</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1,5 g urea•kg<sup>-1</sup>).

**Tabla 8.-** Efecto progresivo de la urea y del plomo en cuatro variables de la raíz del maíz (*Zea mays*).

CONCENTRACIONES (g Pb•kg <sup>-1</sup> de suelo)		TRATAMIENTO	PESO FRESCO (g)	p.	PESO SECO (g)	p.	MATERIA SECA (%)	p.	LONGITUD (cm)	p.
Pb	Urea									
0	0	Control	78,33 ±8,82	ab	11,00 ±2,03	a	14,96 ±4,21	a	91,33 ±2,73	a
0,5	0	T <sub>1</sub>	75,00 ±7,64	ab	10,23 ±1,46	a	13,56 ±0,83	a	91,67 ±10,87	a
0,5	0,5	T <sub>2</sub>	53,33 ±4,41	bc	7,40 ±0,12	a	14,08 ±1,20	a	59,00 ±8,02	a
0,5	1	T <sub>3</sub>	100,00 ±2,89	a	11,73 ±1,83	a	11,85 ±2,18	a	80,33 ±11,20	a
0,5	1,5	T <sub>4</sub>	36,67 ±1,67	c	6,55 ±0,66	a	17,80 ±1,19	a	62,67 ±5,67	a
		F	17,81		2,59		0,92		3,46	
		P.	0,0		0,10		0,49		0,05	
		NOEC	T <sub>3</sub>		T <sub>4</sub>		T <sub>4</sub>		T <sub>4</sub>	
		LOEC	T <sub>4</sub>		ND		ND		ND	

(Pb) Plomo; (F) Estadístico de Fisher; (p.) Nivel de significancia; (NOEC) Concentración máxima hasta donde no se observan efectos progresivos negativos respecto al control; (LOEC) Concentración mínima donde se observan efectos progresivos negativos respecto al control; (±) Error estándar; (ND) No determinado; (\*\*) Para NOEC y LOEC por conveniencia se usaron los valores estadísticamente diferentes más altos en relación al control en el caso de observarse una relación no lineal. Letras minúsculas iguales en una misma columna según la prueba de Tukey indican que los promedios son estadísticamente igual ( $p > 0,05$ ).

## 6. Raíz de la espinaca

En la raíz del maíz se evidenciaron cambios significativos entre los tratamientos para peso seco, materia seca y longitud (Tabla 9).

Para el peso fresco el T<sub>1</sub> fue 206,85 % mayor que el control, el T<sub>2</sub> fue 128,48 % mayor que el control, el T<sub>3</sub> fue 7,07 % mayor que el control y el T<sub>4</sub> fue 35,76 % menor que el

control. El valor de NOEC fue T<sub>4</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1,5 g urea•kg<sup>-1</sup>) y LOEC no se determinó.

Para el peso seco el T<sub>1</sub> fue 127,87 % mayor que el control, el T<sub>2</sub> fue 72,13 % mayor que el control, el T<sub>3</sub> fue 51,64 % menor que el control y el T<sub>4</sub> fue 70,5 % menor que el control. El valor de NOEC fue T<sub>4</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1,5 g urea•kg<sup>-1</sup>) y LOEC no se determinó.

Para la materia seca el T<sub>1</sub> fue 28,48 % menor que el control, el T<sub>2</sub> fue 26,24 % menor que el control, el T<sub>3</sub> fue 56,66 % menor que el control y el T<sub>4</sub> fue 61,98 % menor que el control. Los valores para NOEC y LOEC fueron T<sub>2</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0,5 g urea•kg<sup>-1</sup>) y T<sub>3</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1 g urea•kg<sup>-1</sup>).

Para la longitud el T<sub>1</sub> fue 361,94 % mayor que el control, el T<sub>2</sub> fue 189,56 % mayor que el control, el T<sub>3</sub> fue 106,83 % mayor que el control y el T<sub>4</sub> fue 44,78 % mayor que el control. El valor de NOEC fue T<sub>4</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1,5 g urea•kg<sup>-1</sup>) y LOEC no se determinó.

**Tabla 9.-** Efecto progresivo de la urea y del plomo en cuatro variables de la raíz de la espinaca (*Spinacia oleracea*).

CONCENTRACIONES (g Pb•kg <sup>-1</sup> de suelo)		TRATAMIENTO	PESO FRESCO		PESO SECO		MATERIA SECA		LONGITUD	
Pb	Urea		(g)	p.	(g)	p.	(%)	p.	(cm)	p.
0	0	Control	4,67 ±1,20	b	1,22 ±0,21	bc	27,25 ±2,28	a	9,67 ±1,45	d
0,5	0	T <sub>1</sub>	14,33 ±2,67	a	2,78 ±0,52	a	19,49 ±1,10	b	44,67 ±2,60	a
0,5	0,5	T <sub>2</sub>	10,67 ±2,60	ab	2,10 ±0,44	ab	20,10 ±0,88	ab	28,00 ±2,89	b
0,5	1	T <sub>3</sub>	5,00 ±0,58	b	0,59 ±0,76	bc	11,81 ±0,61	c	20,00 ±0,58	bc
0,5	1,5	T <sub>4</sub>	3,00 ±1,15	b	0,36 ±0,18	c	10,36 ±2,24	c	14,00 ±2,52	cd
F			36*		9,55		18,78		39,87	
P.			<0,05		0,0		0,0		0,0	
NOEC			T <sub>4</sub>		T <sub>4</sub>		T <sub>2</sub>		T <sub>4</sub>	
LOEC			ND		ND		T <sub>3</sub>		ND	

(Pb) Plomo; (F) Estadístico de Fisher; (p.) Nivel de significancia; (NOEC) Concentración máxima hasta donde no se observan efectos progresivos negativos respecto al control; (LOEC) Concentración mínima donde se observan efectos progresivos negativos respecto al control; (±) Error estándar; (ND) No determinado; (\*\*) Para NOEC y LOEC por conveniencia se usaron los valores estadísticamente diferentes más altos en relación al control en el caso de observarse una relación no lineal. Letras minúsculas iguales en una misma columna según la prueba de Tukey indican que los promedios son estadísticamente igual (p>0,05).

### 7. Raíz de la col

En la raíz de la col no se evidenciaron cambios significativos entre todos tratamientos para peso fresco, peso seco, materia seca y longitud. El valor de NOEC fue T<sub>2</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0,5 g urea•kg<sup>-1</sup>) y LOEC no se determinó (Tabla 10).

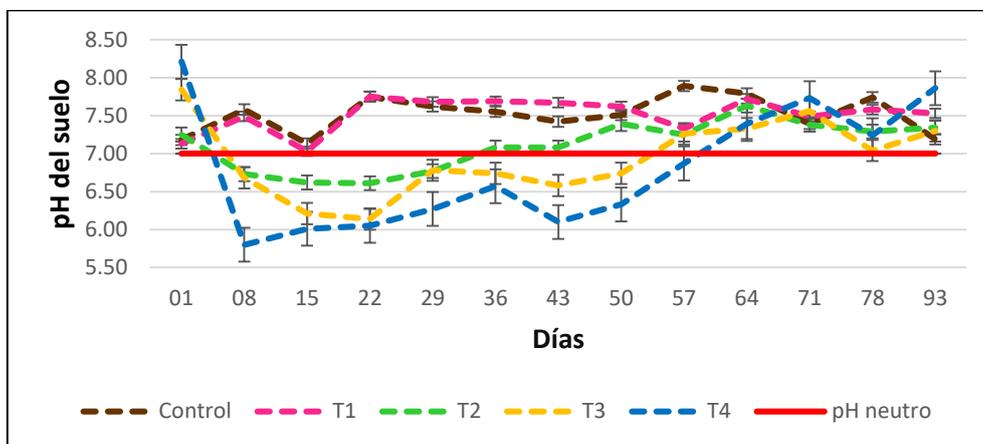
**Tabla 10.-** Efecto progresivo de la urea y del plomo en cuatro variables de la raíz de la col (*Brassica oleracea* var. *capitata*).

CONCENTRACIONES (g Pb•kg <sup>-1</sup> de suelo)		TRATAMIENTO	PESO FRESCO		PESO SECO		MATERIA SECA		LONGITUD	
Pb	Urea		(g)	p.	(g)	p.	(%)	p.	(cm)	p.
0	0	Control	6,33 ±0,33	a	2,00 ±0,17	a	31,44 ±1,40	a	6,33 ±0,33	a
0,5	0	T <sub>1</sub>	9,67 ±4,06	a	1,73 ±0,34	a	24,78 ±8,20	a	9,67 ±4,06	a
0,5	0,5	T <sub>2</sub>	7,33 ±0,88	a	2,11 ±0,35	a	28,66 ±2,40	a	7,33 ±0,88	a
F			0,63*		0,42		0,66		0,63*	
P.			>0,05		0,67		0,45		>0,05	
NOEC			T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub>	
LOEC			ND		ND		ND		ND	

(Pb) Plomo; (F) Estadístico de Fisher; (\*) Se uso el estadístico del Test de Kruskal Wallis porque no cumplía la prueba de normalidad; (p.) Nivel de significancia; (NOEC) Concentración máxima hasta donde no se observan efectos progresivos negativos respecto al control; (LOEC) Concentración mínima donde se observan efectos progresivos negativos respecto al control; (±) Error estándar; (ND) No determinado(\*\*) Para NOEC y LOEC por conveniencia se usaron los valores estadísticamente diferentes más altos en relación al control en el caso de observarse una relación no lineal. Letras minúsculas iguales en una misma columna según la prueba de Tukey indican que los promedios son estadísticamente igual (p>0,05).

8. pH del suelo

El pH del suelo en el maíz, durante los 93 días el control y el T<sub>1</sub> se alcalinizaron ligeramente, asimismo el valor de pH del control en la primera medición fue de 7,18. Sin embargo, el T<sub>2</sub> se mantuvo ligeramente ácido hasta el día 36 y a partir del día 43 se empezó a alcalinizar ligeramente; en el T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub> se acidificaron ligeramente el día 57, a partir del día 64 se alcalinizaron ligeramente (Figura 1).



**Figura 1.-** Comparación de los cinco tratamientos en maíz (*Zea mays*) con respecto al comportamiento del pH del suelo.

El pH del suelo en la espinaca, durante los 93 días el control y el T<sub>1</sub> se alcalinizaron ligeramente, asimismo el valor de pH del control en la primera medición fue de 7,21. Sin embargo, el T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub> se mantuvieron ligeramente ácidos hasta el día 57 y a partir del día 64 se acercó a la neutralidad (Figura 2).

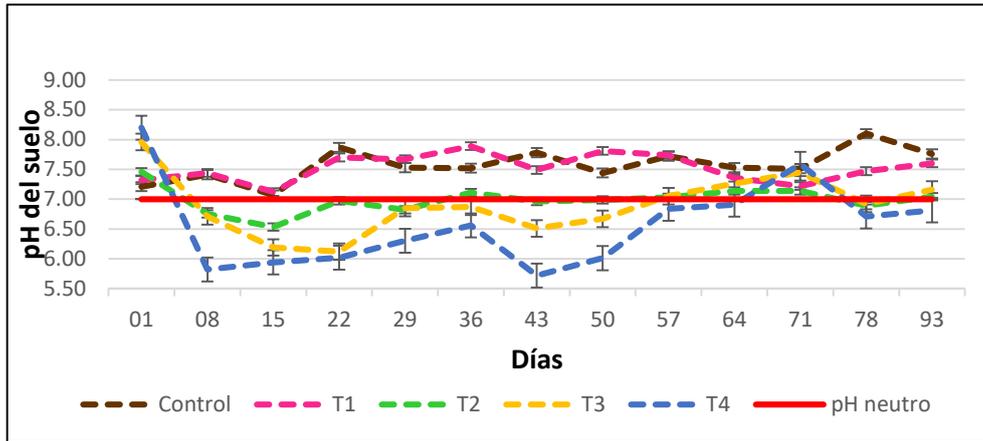


Figura 2 - Comparación de los cinco tratamientos en la espinaca (*Spinacia oleracea*) con respecto al comportamiento del pH del suelo.

El pH del suelo en la col, durante los 93 días el control y el T<sub>1</sub> se alcalinizaron ligeramente, asimismo el valor de pH del control en la primera medición fue de 7,19. Sin embargo, el T<sub>2</sub> se mantuvo ligeramente ácidos hasta el día 22 y a partir del día 29 se alcalinizó ligeramente; el T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub> se acidificó ligeramente hasta el día 15, a partir del día 22, ya no se cuentan con datos debido a que las plantas se murieron (Figura 3).

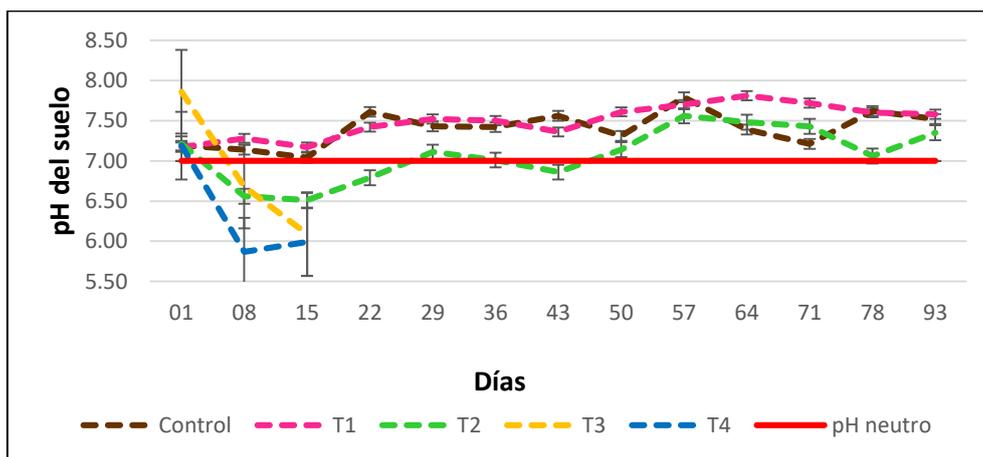
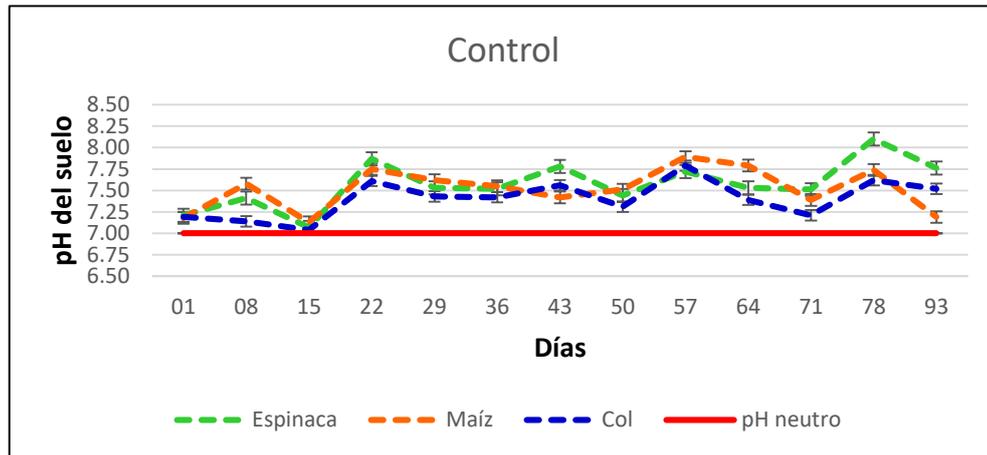
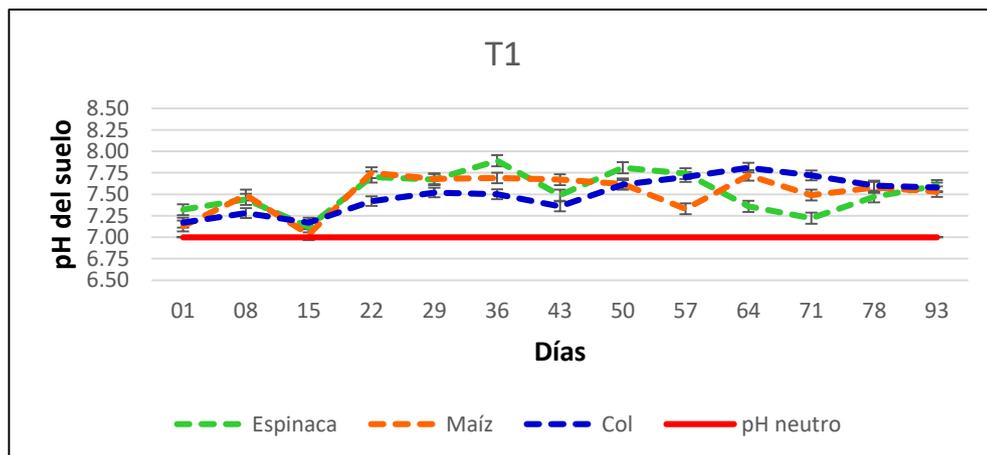


Figura 3.- Comparación de los cinco tratamientos en la col (*Brassica oleracea* var. *capitata*) con respecto al comportamiento del pH del suelo.

El comportamiento del pH entre los tratamientos de las tres especies de plantas son similares, el control y el T<sub>1</sub> se alcalinizaron ligeramente y el T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub> se acidificaron temporalmente para luego acercarse a la neutralidad o alcalinizarse ligeramente (Figuras del 4 al 8).



**Figura 4.-** Comparación del tratamiento control (control) en maíz (*Zea mays*), la espinaca (*Spinacia oleracea*) y col (*Brassica oleracea* var. *capitata*) con respecto al comportamiento del pH del suelo.



**Figura 5.-** Comparación del tratamiento uno (T<sub>1</sub>) en maíz (*Zea mays*), la espinaca (*Spinacia oleracea*) y col (*Brassica oleracea* var. *capitata*) con respecto al comportamiento del pH del suelo.

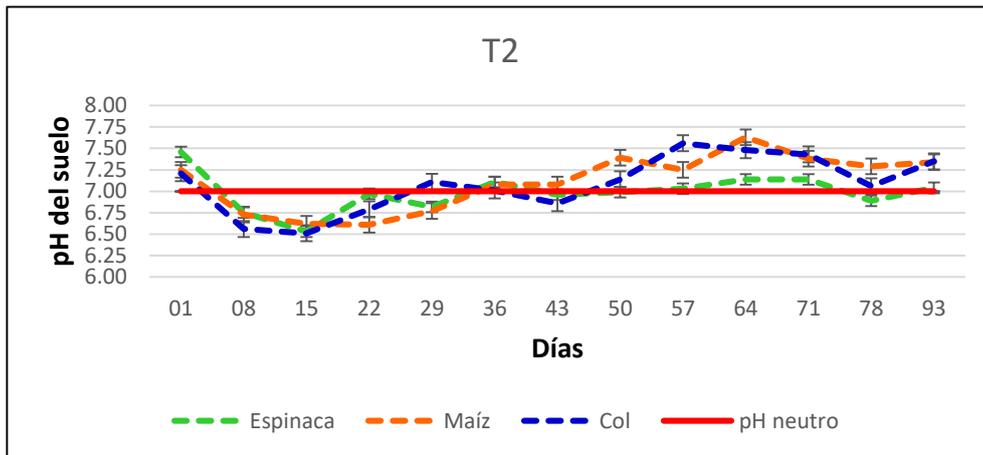


Figura 6.- Comparación del tratamiento dos (T<sub>2</sub>) en maíz (*Zea mays*), la espinaca (*Spinacia oleracea*) y col (*Brassica oleracea* var. *capitata*) con respecto al comportamiento del pH del suelo.

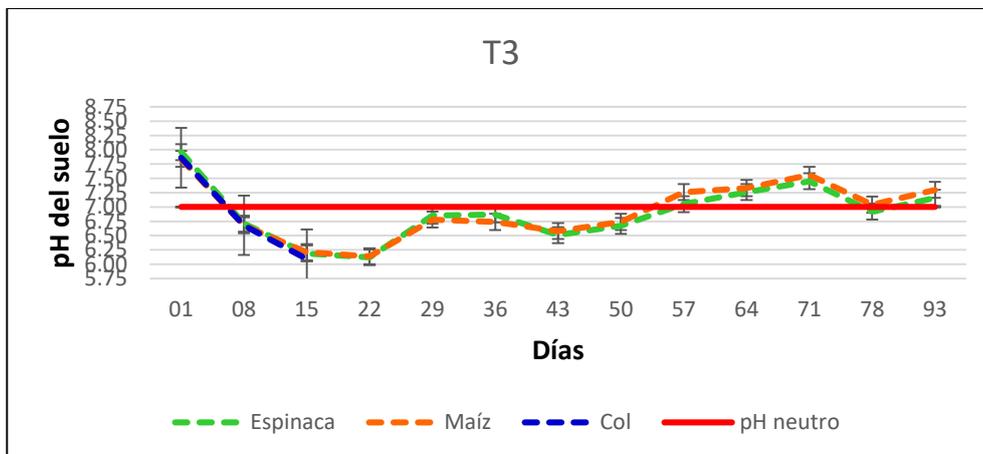
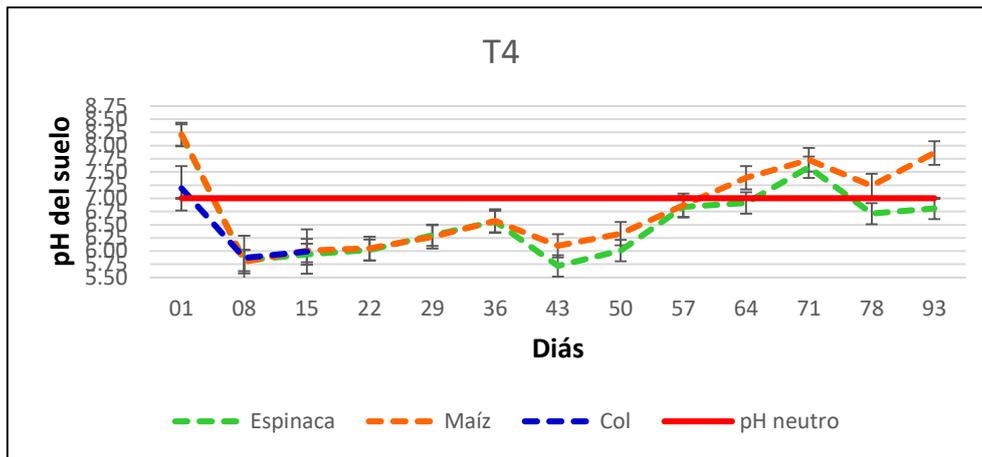


Figura 7.- Comparación del tratamiento tres (T<sub>3</sub>) en maíz (*Zea mays*), la espinaca (*Spinacia oleracea*) y col (*Brassica oleracea* var. *capitata*) con respecto al comportamiento del pH del suelo.



**Figura 8.-** Comparación del tratamiento cuatro (T<sub>4</sub>) en maíz (*Zea mays*), la espinaca (*Spinacia oleracea*) y col (*Brassica oleracea* var. *capitata*) con respecto al comportamiento del pH del suelo.

Se observó que la dosis de urea y el tiempo de acidez tiene una relación directa con el tiempo de acidez del suelo; y, una relación indirecta con el pH del suelo para el maíz y la espinaca (Tabla 11 y 12: Tablas Anexos).

**Tabla 11.-** Valores del coeficiente de correlación de Pearson entre la dosis de urea y el tiempo de acidez del maíz (*Zea mays*), la espinaca (*Spinacia oleracea*) y col (*Brassica oleracea* var. *capitata*).

DOSIS DE UREA (g urea•kg <sup>-1</sup> )	TIEMPO DE ACIDEZ DEL SUELO	
	(días)	p.
MAÍZ	r = 0,98	0,0
ESPINACA	r = 0,98	0,0
COL	r = 1,00	0,0

(p.) Nivel de significancia

**Tabla 12.-** Valores del coeficiente de correlación de Pearson entre la dosis de urea y el pH del suelo del maíz (*Zea mays*), la espinaca (*Spinacia oleracea*) y col (*Brassica oleracea var. capitata*).

DOSIS DE UREA (g urea•kg <sup>-1</sup> )	PH DE SUELO	p.
MAÍZ	r = - 0,97	0,01
ESPINACA	r = - 0,97	0,01
COL	r = -0,98	0,14

(p.) Nivel de significancia

También se observó que el pH del suelo tiene una relación indirecta con el Pb foliar para la espinaca (Tabla 13; Tablas Anexos).

**Tabla 13.-** Valores del coeficiente de correlación de Pearson entre el pH del suelo y el Pb foliar del maíz (*Zea mays*), la espinaca (*Spinacia oleracea*) y col (*Brassica oleracea var. capitata*).

PH DE SUELO	PB FOLIAR (ppm)	p.
MAÍZ	r = -0,17	0,79
ESPINACA	r = -0,95	0,01
COL	r = 0,73	0,48

(p.) Nivel de significancia

## 9. Límite máximo permisible (LMP) de plomo en alimentos

Se evidenció que la concentración de plomo en la estructura foliar en todos los tratamientos de la espinaca, el maíz y la col superaron el LMP de plomo tanto del Codex Alimentarius (legislación peruana) y la de otros países (Tabla 14).

**Tabla 14.-** Comparación del plomo en la estructura foliar del maíz (*Zea mays*), la espinaca (*Spinacia oleracea*) y col (*Brassica oleracea* var. *capitata*) con el límite máximo permisible del Codex Alimentarius (legislación peruana) y legislación de otros países.

ESPECIE DE PLANTA	TRATAMIENTO	PB FOLIAR (ppm)	CODEX ALIMENTARIUS (Pb ppm)	UNIÓN EUROPEA Y FINLANDIA (Pb ppm)		AUSTRALIA Y NUEVA ZELANDA (Pb ppm)	BRASIL (Pb ppm)	JAPÓN (Pb ppm)
ESPINACA	Control	5,01		0,10	0,10	0,10	0,50	5,00
	T <sub>1</sub>	7,68		0,10	0,10	0,10	0,50	5,00
	T <sub>2</sub>	10,31		0,10	0,10	0,10	0,50	5,00
	T <sub>3</sub>	11,78		0,10	0,10	0,10	0,50	5,00
	T <sub>4</sub>	18,07		0,10	0,10	0,10	0,50	5,00
MAÍZ	Control	2,90	0,05	0,05	0,20	0,50		
	T <sub>1</sub>	7,34	0,05	0,05	0,20	0,50		
	T <sub>2</sub>	5,73	0,05	0,05	0,20	0,50		
	T <sub>3</sub>	6,43	0,05	0,05	0,20	0,50		
	T <sub>4</sub>	5,17	0,05	0,05	0,20	0,50		
COL	Control	5,25	0,30	0,30	0,30	0,50		
	T <sub>1</sub>	6,54	0,30	0,30	0,30	0,50		
	T <sub>2</sub>	5,13	0,30	0,30	0,30	0,50		

(Pb) Plomo; (Control) Se aplicó 0 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo; (T<sub>1</sub>) Se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo; (T<sub>2</sub>) Se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0,5 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo; (T<sub>3</sub>) Se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1,0 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo; (T<sub>4</sub>) Se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1,5 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo.

## VI. DISCUSIÓN

### 1. Efecto de los tratamientos en la clorofila

La clorofila en el maíz, la espinaca (T<sub>2</sub>) y la col, fue mayor en los tratamientos donde se aplicó urea. Según Sombai, Prajitmo y Syukur (2013), el aumento de los niveles de clorofila se debe a que el nitrógeno proveniente de la urea puede ser absorbido a través de las raíces y ser utilizado para formar más clorofila. La clorofila es el pigmento principal de las plantas que sirven para captar la energía del sol, lo que desencadena la fijación de CO<sub>2</sub> para producir carbohidratos que luego se convierten en energía para ser utilizado por las plantas para el crecimiento vegetativo y generativo (Ai y Banyo, 2011). El nitrógeno al ser absorbido por las plantas juega un papel en la formación de clorofila indicado por el aumento del color de la hoja verde (Surya y Suyono, 2013).

### 2. Efecto de los tratamientos en el peso fresco y peso seco

El peso fresco en el maíz (T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub>) fue mayor en los tratamientos donde se aplicó urea y en la espinaca tuvo mayor peso fresco en el T<sub>2</sub>. El nitrógeno es un elemento esencial ya que es un componente de la proteína de los vegetales y la clorofila. Por lo tanto, es esencial para la fotosíntesis, el crecimiento vegetativo (peso fresco) y reproductivo, y a menudo determina el rendimiento del maíz (Igbal et al., 2006). Según Habinsaran, Hendarto, Elzhivago y Yulistiani (2018), señalan que al aumentar los niveles de nitrógeno se incrementa el peso fresco por planta, y se puede atribuir a una mayor disponibilidad de nitrógeno con el aumento de la tasa de fertilizante nitrogenado.

En la espinaca se observó que el T<sub>4</sub> presentó la mayor concentración de Pb foliar y la vez el menor peso fresco (T<sub>4</sub>-LOEC). Se presentaron efectos similares en investigaciones con *Plantago major* L. y espinaca, donde se observó una inhibición en el peso fresco y seco en las diferentes partes de la planta al estar expuestas a Pb (Kosobrukhov et al., 2004; Lamhamdi et al., 2013). Según Cao et al. (2015), los síntomas específicos de exposición al Pb en plantas se caracterizan por la reducción del peso seco en la parte aérea, dado que, el Pb causa disminución del contenido proteico en los tejidos y alteración en la composición de lípidos.

En el maíz, los tratamientos donde se aplicó Pb (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub>) obtuvieron un mayor peso seco en comparación con el control. Según Hu et al. (2015), la reducción en el peso seco en las plantas que están expuestas a Pb presentan variabilidad dependiendo de la especie, como se evidenció en plantas de *P. major*, donde se observó una disminución del peso seco, pero también se notó el efecto contrario, en *Z. mays* donde se vio un aparente incremento del peso seco con el aumento en la síntesis de polisacáridos en la pared celular.

### 3. Efecto de los tratamientos en la altura

En el maíz el T<sub>2</sub> presentó la mayor altura. La aplicación de urea afecta significativamente en la altura de la planta (Uwah, Undie y Jhon, 2014). El nitrógeno tiene una función importante en los procesos fisiológicos vitales para el ciclo de vida de las plantas, como la fotosíntesis, la absorción de iones, la respiración, la multiplicación y diferenciación celular y la herencia (Epstein y Bloom, 2006) y, por lo tanto, afecta el crecimiento y aprovechamiento de las plantas (Gulser, 2005) porque es un componente importante

de proteínas, enzimas y vitaminas. Por el contrario, en el maíz en los T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub> se observó que a mayor aplicación de urea la altura disminuye. Estos efectos también se han observado en plantas de camu-camu (*Myrciaria dubia* (Kunth) McVaugh), donde la dosis de 123 kg•ha<sup>-1</sup> de nitrógeno aplicado produjo plantas de mejor calidad y se concluyó que dosis mayores causaron efectos depresivos sobre el crecimiento de las plantas en el primer año (Abanto et al., 2016).

#### 4. Efecto de los tratamientos en el área foliar

En la espinaca en el T<sub>4</sub> (NOEC) se observó una mayor concentración de Pb foliar y a la vez una mayor reducción en el área foliar en comparación con el T<sub>1</sub> donde la concentración del Pb foliar fue menor. Este síntoma puede tener relación con el efecto inhibitorio del Pb en el crecimiento de las diferentes partes aéreas de la planta (Kopittke et al., 2007), donde se observa una menor cantidad de hojas, un menor tamaño y una mayor fragilidad (Gupta et al., 2009). Esto puede atribuirse a trastornos metabólicos de los nutrientes (Kopittke et al 2007, Gopal y Rizvi 2008) y a una perturbación de la fotosíntesis (Islam et al., 2008).

#### 5. Respuesta de la col a los tratamientos

Los T<sub>3</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1,0 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo) y T<sub>4</sub> (0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1,5 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo) no fueron exitosos debido a que las plantas murieron a los 21 días. Este efecto se puede haber influenciado por la toxicidad del Pb, la que genera el Pb cuando existe en concentraciones que no superan 1 g de Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo, el Pb se acumula en mayor cantidad en los diferentes órganos de la planta y al no tolerarlas

mueren (Rodríguez-Ortiz et al., 2006). Asimismo, también puede haber influenciado la acidez del suelo debido a que ambos tratamientos presentaron el valor de pH más bajo (5,87) durante las primeras semanas. La col tiene un rango óptimo de pH entre 6,2 – 6,5 (FAXSA, 2002) y es poco tolerante a la acidez (Roberto et al., 2000). O a la interacción de ambos factores porque la biodisponibilidad del Pb en las plantas depende del pH del suelo (López, Guzmán, Santos, Prieto y Román, 2005).

#### 6. Respuesta de la espinaca a los tratamientos

La espinaca obtuvo mayores concentraciones de Pb foliar en comparación con el maíz y la col. Existen especies de plantas con capacidad de almacenar mayores concentraciones de metales específicos en las partes aéreas (Pilon-Smits, 2005; Callahan et al., 2006), en la espinaca podría estar relacionada con una mayor capacidad para resistir el estrés oxidativo generado por el Pb (Lamhamdi et al., 2010), además posee la capacidad de acumular metales pesados como Cr, Cu, Ni, Pb y Cd y una mayor capacidad de translocación para el plomo comparado con otras especies de plantas (Kumara et al., 2013).

#### 7. Efecto del Pb en la raíz

En el maíz el T<sub>4</sub> (LOEC) presentó el menor peso fresco. La fitotoxicidad del Pb en las plantas se presenta particularmente en los suelos ácidos y afecta a la formación de raíces secundarias y laterales; y, a su crecimiento (Tadeo y Gómez-Cadenas, 2008; Miranda et al., 2008; Tian et al., 2014). Este efecto se puede haber dado en la raíz del maíz porque presenta las dos condiciones (acidez del suelo y presencia de Pb). Esta inhibición del

crecimiento radicular puede ser resultado del efecto causado por el Pb en la división celular como se observó en plántulas de acelga y lechuga (Chen et al., 2015; Rico, 2017).

En el T<sub>1</sub> de la espinaca, donde se aplicó Pb pero no urea, los valores para peso fresco, peso seco y longitud fueron mayores. Estos resultados se pueden deber a que no presentó la condición de acidez necesaria causada por la urea para que se manifieste la toxicidad del Pb en la raíz. Por otro lado, en el T<sub>3</sub> (LOEC) y T<sub>4</sub> de la espinaca, donde se aplicó Pb y urea, la materia seca tuvo valores menores. Estos resultados se pueden deber a que la urea generó la condición de acidez necesaria para que se manifieste la toxicidad del Pb en la raíz (Tadeo y Gómez-Cadenas, 2008; Miranda et al., 2008; Tian et al., 2014).

#### 8. Acidificación del suelo

En el maíz, espinaca y col, en los tratamientos donde se aplicó urea (T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>), durante los primeros siete días el suelo se alcalinizó ligeramente para luego acidificarse temporalmente. Esto se debe a que la urea al ser aplicada al suelo tiene dos comportamientos, uno básico durante los primeros días cuando pasa de amida a carbonato amónico y uno ácido cuando pasa de la forma amoniacal a la nítrica (liberando H<sup>+</sup> al medio), por tanto al final el comportamiento de la urea es ácido (FERTIBERIA, 2002).

Sin embargo, la acidificación del suelo puede ser duradero o temporal, y el grado de intensidad con el que varía es a causa de aplicaciones continuas de fertilizantes nitrogenados como la urea (Baldoncini, 2015), en nuestra investigación fue temporal debido a que solo se aplicó una vez, y esta temporalidad tuvo una relación directa con la dosis de urea, a mayor dosis de urea mayor tiempo de acidez del suelo. Además, la

acidez y el contenido de N inorgánico del suelo se incrementan con el aumento de la dosis de urea aplicada (Boccolini, 2016) lo mismo se observó en esta investigación donde los valores de pH fueron menores a mayor aplicación de urea.

#### 9. LMP del Pb

En el maíz, la espinaca y la col, todos los tratamientos incluido el control superaban los LMP para Pb del Codex Alimentarius (0,05 ppm para maíz y 0,3 ppm para la col) y otros países (0,1; 0,5 y 5 ppm para la espinaca), cabe señalar que en el control no se aplicó Pb en forma de acetato de Pb, pero este ya contenía 26 ppm (concentración menor a los LMP para Pb en suelo agrícola en la Legislación Peruana) en el suelo de chacra que se usó para hacer el sustrato de invernadero. Estos resultados se pueden ver reflejados en las labores de cultivo donde se utilizan cotidianamente en gran cantidad agroquímicos, abonos orgánicos y plaguicidas (Pesca, 2015), esta sobredosificación en la aplicación tanto en la cantidad como la frecuencia (Torres y Ramírez, 2014) aumenta la probabilidad de transferencia o absorción de metales pesados en los alimentos, suelos y agua (Consejo Nacional de Política Económica y Social [CONPES], 2014). En Perú ya existen investigaciones donde se evidencia que alimentos como la papa (Luna y Rodríguez, 2016) y el huevo (Gonzáles, 2015) superan los LMP para Pb en alimentos.

#### 10. Comparación Pb foliar, N foliar y clorofila

En el T<sub>1</sub> las tres especies de plantas tuvieron una misma concentración de Pb sin embargo se observó diferencias en el N foliar y clorofila. Según Chatterjee et al. (2004), el Pb produce alteraciones en alteraciones en el metabolismo del nitrógeno el cual

puede generar un aumento o disminución de N foliar y la clorofila, debido a que el nitrógeno es un componente esencial de la clorofila (Iqbal et al., 2006).

En el T<sub>2</sub> se observó que la espinaca tuvo una mayor concentración de Pb y a su vez un mayor porcentaje de N foliar y clorofila. Estos resultados se relacionan que la espinaca tiene una mayor capacidad para almacenar y translocar Pb comparado con otras especies (Kumara et al., 2013), así como la capacidad tolerar el estrés producido por el Pb (Lamhamdi et al., 2010).

## VII. CONCLUSIONES

Se determinó los efectos del plomo en el maíz en el aumento del peso seco y en la espinaca (T4) en la disminución del peso fresco, peso seco y área foliar. Asimismo, la urea aumentó los valores de clorofila en el maíz, la espinaca y la col, Lo que señala que la urea influye en la absorción de plomo en su estructura foliar en el maíz, la espinaca y la col.

Se evaluó que el efecto del plomo en la raíz del maíz (T4) se manifiesta en la disminución del peso fresco; y, mientras que en la raíz de la espinaca (T1), se observa en el aumento del peso fresco, peso seco y longitud. Lo que indica que la absorción de plomo afectó las raíces del maíz y la espinaca

Se determinó que la espinaca es la especie vegetal que absorbió mayor plomo en la estructura foliar (T4), por lo que muestra que tiene una mayor capacidad de almacenamiento de plomo en sus hojas en comparación con el maíz y la col.

Se determinó en el maíz y la espinaca que existe una relación directa entre la dosis de urea y el tiempo de acidez del suelo, y una relación indirecta entre la dosis de urea y el valor de pH, lo que significa que la urea influye en la acidificación del suelo.

Las plantas del T3 y T4 de la col no fueron exitosas a los 21 días, el cultivo murió debido a su potencial poca tolerancia a pH bajos, a la toxicidad del plomo o a la interacción de ambos.

## VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abanto, C., Alves, E., Costa, T., Tadashi, R., Farias, W. & Da Silva, J. (2016). Early growth of camu-camu plants with nitrogen fertilization through fertirrigation. *Scientia Agropecuaria*, 7(4): 297-304.

AGRODATA PERÚ. (2018). Urea Perú Importación 2018 Mayo. Recuperado el 22 de junio del 2018 de <https://www.agrodataperu.com/2018/06/urea-peru-importacion-2018-mayo.html>

AGRODATA PERÚ. (2019a). Maíz amarillo Perú Importación 2019 Febrero. Recuperado el 15 de abril del 2019 de <https://www.agrodataperu.com/2019/03/maiz-amarillo-peru-importacion-2019-febrero.html>

AGRODATA PERÚ. (2019b). Urea Perú Importación 2019 Febrero. Recuperado el 15 de abril del 2019 de <https://www.agrodataperu.com/2019/03/urea-peru-importacion-2019-febrero.html>

Ai, NS. & Banyo Y. (2011). Konsentrasi klorofil daun sebagai indikator kekurangan pada tanaman (The concentration of leaf chlorophyll as water-deficit indication in plants). *Jurnal Ilmiah Sains*, 11(2): 166- 173.

Ali, M., & Al-Qahtani, K. (2012). Assessment of some heavy metals in vegetables, cereals and fruits in Saudi Arabian markets. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 38: 31-37.

Arshad, M., Silvestre, J., Pinelli, E., Kallerhoff, J., Kaemmerer, M., Tarigo, A., Shahid, M., Guiresse, M., Pradere, P. & Dumat, C. (2008). A field study of lead phytoextraction by various scented *Pelargonium* cultivars. *Chemosphere*, 71(11): 2187–2192.

Asociación Internacional de Fertilizantes [IFA]. (2013). Indicadores de fertilizantes. Recuperado el 23 de mayo del 2015 de <http://www.fertilizer.org>

Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes [AIIF]. (2014). Short-Term Fertilizer Outlook 2017-2018. Recuperado el 22 de junio del 2018, de <https://www.ifastat.org/supply/Nitrogen%20Products/Urea>

Azimzadeh, Y., Shirvani, M., & Shariatmadari, H. (2014). Green manure and overlapped rhizosphere effects on Pb chemical forms in soil and plant uptake in maize/canola intercrop systems: a Rhizobox study. *Soil Sediment Contamination: An International Journal*, 23: 677–690.

Baldoncini, A. (2015). Efectos de la aplicación de fertilizantes sobre el pH de suelos serie Oncativo (Tesis para título). Universidad Nacional de Córdoba, Colombia.

Bellido, J. (2018). Niveles de plomo en los suelos de la urbanización Primavera, distrito de El Agustino. (Tesis para título). Universidad Nacional Federico Villarreal, Perú.

Bhargava, A., Carmona, F., Bhargava, M., & Srivastava, S. (2012). Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. *Journal of Environmental Management*, 105: 103-120.

Bi, X., Ren, L., Gong, M., He, Y., Wang L. & Ma, Z. (2010). Transfer of cadmium and lead from soil to mangoes in an uncontaminated area, Hainan Island, China. *Geoderma*, 155(1–2):115–120.

Boccolini, M. (2016). Impacto de la aplicación prolongada de urea sobre la comunidad de bacterias oxidantes del amoníaco en un suelo argiudol típico de Argentina (Tesis para magister). Universidad Nacional de Córdoba, Colombia.

Callahan, D., Baker A., Kolev, S., & Wedd, A. (2006). Metal ion ligands in hyperaccumulating plants. *Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 11: 2-12.

Calzada, R., Arriaga, O., Sandoval, A., Ávila, J., Hernández, A., Torres, R., & Cepeda, R. (2009). Fitoextraction of lead and cadmium in contaminated soil. *Revista Chapingo Serie Zonas Aridas*, 8: 247-253.

Campillo, R., Jobet, C., y Undurraga, P. (2007). Optimización de la fertilización nitrogenada para trigo de alto potencial de rendimiento en andisoles de la región de la Araucanía. *Agricultura Técnica*, 67: 281-291.

Cao, D., Shi, X., Xie, P., Zhang, H., & Deng, J. (2015). Effects of lead on tolerance, bioaccumulation, and antioxidative de- fense system of green algae, *Cladophora*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 112: 231–237.

Chatterjee, C., Dube, B., Sinha, P. y Srivastava, P. (2004). Detrimental effects of lead phytotoxicity on growth, yield, and metabolism of rice. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35: 255–265.

Collins J., Whiteside E. & Cress, E. (1970). Seasonal variability and lime requeriments in several southern Michigan soils when measured in different ways. *Soil Science Society of America*, 34: 56-61.

Epstein, E. y Bloom, A. (2006). *Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas*. 2ªed. Londrina, Brasil: Planta. 403p.

García, D., Barceló, J., y Gunsé, B. (2007). Efectos fisiológicos y compartimentación radicular en plantas de *Zea mays* L. expuestas a la toxicidad por plomo (Tesis doctoral). Universidad Autónoma de Barcelona, España.

Gopal, R. & Rizvi, A. (2008). Excess lead alters growth, metabolism and translocation of certain nutrients in radish. *Chemosphere*, 70(9): 1539–1544.

Chen, M., Zhang, L., Li, J., Jia He, X., & Chi Cai, J. (2015). Bioaccumulation and tolerance characteristics of a submerged plant (*Ceratophyllum demersum* L.) exposed toxic metal lead. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 122: 313–321.

Cheyns, K., Peeters, S., Delcourt, D., & Erik Smolders. (2012). Lead phytotoxicity in soils and nutrient solutions is related to lead induced phosphorus deficiency. *Environmental Pollution*, 164: 242-247.

Ciarlo, E.A. y Palma, M. (2011). Nitrógeno del suelo. En Conti, M.E. y Giuffré, L. (Eds.), *Edafología, bases y aplicaciones ambientales Argentina* (pp. 363-384). Argentina: Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Consejo Nacional de Política Económica y Social [COMPES]. (2014). *Manejo Ambiental Integral de la Cuenca Hidrográfica del Lago de Tota*. Bogotá.

Costello, M., Beard, K., Corlett, R., Cumming, G., Loyola, R., Mass, B., Miller-Rushing, A., Pakeman, R. & Primack, R. (2016). Field work ethics in biological research. *Biological Conservation*, 203:268-271.

Darwich, N.A. (2006). Nitrógeno: “Constructor de Proteínas”. En Darwich, N.A. (Ed.), *Manual de fertilidad de suelos y uso de fertilizantes* (pp. 61-87). Mar del Plata, Argentina: 3ra Ed. Fertilizar Asociación Civil.

Departamento de Laboratorios. (2017). *Manual para el manejo y eliminación de residuos químicos y biológicos*. Lima: Universidad Científica del Sur.

FAXSA. (2002). Col repollo, información general y de cultivo. Recuperado el 10 de junio del 2018 de <http://www.faxsa.com.mx/semhort1/c60cl001.htm>

FERTIBERIA. (2002). Incidencia de los fertilizantes sobre el pH del suelo. Recuperado el 15 de junio del 2018 de [http://oa.upm.es/3176/2/MARISCAL\\_MONO\\_2002\\_01.pdf](http://oa.upm.es/3176/2/MARISCAL_MONO_2002_01.pdf)

Gonzáles, S. (2015). Determinación cuantitativa de plomo, cadmio y mercurio en huevos de gallina de venta en mercados populares del cono norte de Lima – Perú (Tesis para magister). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú.

Gulser, F. (2005). Effects of ammonium sulphate and urea on NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and NO<sub>2</sub><sup>-</sup> accumulation, nutrient contents and yield criteria in spinach. *Scientia Horticulture*, 106: 330-340.

Gupta, D., Nicoloso F., Schetinger, M., Rossato, L., Pereira, L., Castro, G., Srivastava, S. & Tripathi, R. (2009). Antioxidant defense mechanism in hydroponically grown Zea mays seedlings under moderate lead stress. *Journal of Hazardous Materials*, 172(1):479–484.

Habinsaran D., Hendarto K., Elzhivago S. & Yulistiani A. (2018). The effect of organic fertilizer and urea fertilizer on growth, yield and quality of sweet corn and soil health. *Asian Journal Agriculture and Biology*, 6(3):335-344.

Helyar, K. (1976). Nitrogen cycling and soil acidification. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science*, 42: 217-221.

Hurtado, E., Gónzales, F., Röper, C., Bástias, E. y Manzuela, P. (2017). Propuesta para la determinación del contenido de clorofila en hojas de tomate. *IDESIA (Chile)*, 35:129-130.

Iannacone, J., Alvaríño, L. y Paredes, C. (2009). Evaluación del Riesgo Ambiental del Arseniato de Plomo en Bioensayos con Ocho Organismos no Destinatarios. *Journal of Brazilian Society of Ecotoxicology*, 4:73-82.

Instituto Nacional de Innovación Agraria [INIA]. (2013). Manejo técnico del cultivo de maíz amarillo duro en la región San Martín. Recuperado el 15 de abril del 2019, de [http://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/inia/149/1/Cultivo\\_maiz\\_amarillo\\_2013.pdf](http://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/inia/149/1/Cultivo_maiz_amarillo_2013.pdf)

Islam, E., Liu, D., Li, T., Yang, X., Jin, X., Mahmood, Q., Tian, S. & Li, J. (2008). Effect of Pb toxicity on leaf growth, physiology and ultrastructure in the two ecotypes of *Elsholtzia argyi*. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1–3): 914–926.

.Iqbal, M., Ashraf, M. & Jamil, A. (2006). Seed enhancement with cytokinins: changes in growth and grain yield in salt stressed wheat plants. *Plant Growth Regulation*, 50: 29-39.

Kabata-Pendias, A. (2000). Trace elements in soils and plants. Third Ed. CRC Press, Inc. Boca Raton. USA. pp.365-413.

Kopittke, P., Asher, C., Kopittke, R. & Menzies, N. (2007) Toxic effects of Pb<sup>2+</sup> on growth of cowpea (*Vigna unguiculata*). *Environmental Pollution*, 150(2):280–287

Kosobrukhov, A., Knyazeva, I. & Mudrik, V. (2004). *Plantago major* plants responses to increase content of lead in soil: growth and photosynthesis. *Plant Growth Regulation*, 42(2):145–151.

Kumara, N., Sanjeev, K., Dwivedia, N., Singha, P., & Barmanb, S. (2013). Accumulation of metals in weed species grown on the soil contaminated with industrial waste and their phytoremediation potential. *Ecological Engineering*, 61: 491–495.

Lamhamdi, M., Bakrim, A., Aarab, A., Lafont, R. & Sayah, F. (2010). A comparison of lead toxicity using physiological and enzymatic parameters on spinach (*Spinacia oleracea*) and wheat (*Triticum aestivum*) growth. *Moroccan Journal of Biology*, 6–7: 64–73.

Lamhamdi, M., El, O., Bakrim, Novoa, J., Arias, M., Aarab, A. & Lafont, R. (2013). Effect of lead stress on mineral content and growth of wheat (*Triticum aestivum*) and spinach (*Spinacia oleracea*) seedlings. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 20: 29-36.

Liu, T., Liu, S., Guan, H., Ma, L., Chen, Z. & Gu, H. (2009). Transcriptional profiling of *Arabidopsis* seedlings in response to heavy metal lead (Pb). *Environmental Experimental Botany*, 67(2):377–386.

Liu, X., Song, Q., Tang, Y., Li, W., Xu, J., Wu, J., et al. (2013). Human health risk assessment of heavy metals in soil–vegetable system: A multi-medium analysis. *Science of the Total Environment*, 463–464: 530–540.

López, P., Guzmán, F., Santos, E., Prieto, F., y Román, A. (2005). Evaluación de la calidad física de diferentes variedades de cebada (*Hordeum sativum* jess) cultivadas en los estados de Hidalgo y Tlaxcala, México. *Revista Chilena de Nutrición*, 32: 247-253.

López, E., y Espinoza, A. (2011). El cultivo de maíz en México y la contribución del fitomejorador para favorecer la autosuficiencia. Universidad Autónoma de la Laguna, Mexico.

Lu, Y., Yin, W., Huang, L., Zhang, G., & Zhao Y. (2011) Assessment of bioaccessibility and exposure risk of arsenic and lead in urban soils of Guangzhou City, China. *Environmental Geochemistry and Health*, 33: 93–102.

Luna, R y Rodriguez, V. (2016). Determinación de las concentraciones de cadmio y plomo en papa (*Solanum tuberosum*) cosechada en las cuencas de los ríos Mashcón y Chonta – Cajamarca (Tesis para título). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú.

Méndez, J., González, C., Román, A., y García, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10: 29-44.

Ministerio de Industria, Comercio y Turismo [MINCOTUR]. (2017). Legislación internacional de residuos de plaguicidas en productos vegetales. Recuperado el 11 de mayo del 2018 de <http://plaguicidas.comercio.es/MetalPesa.pdf>

Ministerio de Agricultura y Riego [MINAGRI]. (2018). Plan Nacional de Cultivos 2018 - 2019. Recuperado el 15 de abril del 2019, de [https://www.agromoquegua.gob.pe/doc/PLAN\\_NACIONAL\\_DE\\_CULTIVOS\\_2018-2019.pdf](https://www.agromoquegua.gob.pe/doc/PLAN_NACIONAL_DE_CULTIVOS_2018-2019.pdf)

Ministerio de Agricultura y Riego [MINAGRI]. (2019). El Agro en Cifras. Recuperado el 15 de abril del 2019, de [http://siea.minagri.gob.pe/siea/sites/default/files/boletin-estadistico-mensual-el-agro-en-cifras-ene19-260319\\_1.pdf](http://siea.minagri.gob.pe/siea/sites/default/files/boletin-estadistico-mensual-el-agro-en-cifras-ene19-260319_1.pdf)

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2013). Se aprobó notificación de Perú sobre prohibición del arseniato de plomo como plaguicida en agricultura. Recuperado el 11 de mayo del 2019, de <http://www.minam.gob.pe/prensa/2013/11/20/se-aprobo-notificacion-de-peru-sobre-prohibicion-del-arseniato-de-plomo-como-plaguicida-en-agricultura/>

Ministerio de Energía y Minas [MINEM]. (2019). PERÚ: PAÍS LÍDER DE LOS METALES DEL FUTURO. Recuperado el 15 de abril del 2019, de <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/VARIABLES/2019/2BEMENE2019.pdf>

Ministerio de Salud [MINSAL]. (2016). Metales pesados y contaminación ambiental, retos para la prevención y control. Recuperado el 15 de abril del 2019, de <http://www.dge.gob.pe/portal/docs/renace/JornadaCientifica/viernes23/vigilanciametalesperu.pdf>

Ministerio de Salud [MINSAL]. (2019). Vigilancia epidemiológica – Exposición a metales pesados. Recuperado el 15 de abril del 2019, de <https://www.dge.gob.pe/portal/docs/vigilancia/sala/2019/SE11/metales.pdf>

Miranda L., Carranza, D., y Fischer, G. (2008). Calidad del agua de riego en la Sabana de Bogotá (Tesis para título). Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Nina, O. (2014). Efecto del abonamiento con dos tipos de preparación de compost en el rendimiento de cuatro variedades de repollo (*Brassica oleracea* L. var. Capitata) en K'ayra - Cusco. (Tesis para título). Universidad Tecnológica de los Andes. Cusco, Perú.

Noble, A., Suzuki, S., Soda W., Ruaysoongnern, S., & Berthelsen, S. (2008). Soil acidification and carbon storage in fertilized pastures of Northeast Thailand. *Geoderma*, 144:248-255.

Nolasco, G. (2001). Determinación de la concentración de plomo en suelos de Lima Metropolitana y su repercusión en la contaminación ambiental. (Tesis para título). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (1993). El maíz en la nutrición humana. Recuperado el 25 de mayo del 2015, de <http://www.fao.org/docrep/t0395s/t0395s02.htm>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2002). Los fertilizantes y su uso. Recuperado el 25 de mayo del 2015, de <ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/fertuso.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2014). Ahorrar para crecer. Recuperado el 25 de mayo del 2015, de <http://www.fao.org/docrep/014/i2215s/i2215s.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2015a). El uso de fertilizantes sobrepasará los 200 millones de toneladas en 2018. Recuperado el 25 de mayo del 2015, de <http://www.fao.org/news/story/es/item/277654/icode/>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2015b). Agricultura urbana y periurbana en América Latina y el Caribe. Recuperado el 20 de abril del 2019, de <http://www.fao.org/ag/agp/greenercities/es/cmvalc/lima.html>

Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2014). Intoxicación por plomo y salud. Recuperado el 12 de junio del 2015, de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs379/es/>

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. (2012). La urea y su comercialización en Chile. Recuperado el 30 de mayo del 2015, de [www.odepa.gov.cl](http://www.odepa.gov.cl)

Olivares, S., García, D., Lima, L., Saborit, I., Llizo, A. y Pérez, P. (2013). Niveles de cadmio, plomo, cobre y zinc en hortalizas cultivadas en una zona altamente urbanizada de la ciudad de la Habana, Cuba. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 29(4): 285-294.

Oriundo, C. y Robles, J. (2009). Determinación de plomo en suelos debido a la contaminación por fábricas aledañas al Asentamiento Humano cultura y progreso del distrito de Ñaña – Chaclacayo (Tesis para título). Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.

Pesca, S.Y. (2015). Seguimiento del comportamiento físico y químico de los agroquímicos más utilizados en el cultivo de cebolla larga en el entorno cercano del lago de Tota y aplicación del modelo CEPIS para evaluar su impacto (Tesis para título). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia.

Pletsch, R. (2003). Cultivo de Repollo. Recuperado el 23 de marzo del 2018, de [http://www.inta.gov.ar/corrientes/info/documentos/doc\\_pagina/El%20cultivo%20del%20Repollo.pdf](http://www.inta.gov.ar/corrientes/info/documentos/doc_pagina/El%20cultivo%20del%20Repollo.pdf)

Pighín, A., y Rossi, A. (2010). Espinaca fresca, supercongelada y en conserva: contenido de vitamina c pre y post cocción. *Revista Chilena de Nutrición*, 37: 201-207.

Ping, H., Jia-bao, Z., Xiu-li, X., An-ning, Z., Cong-zhi, Z., Dong-hao, M., Zhu, Q.G., Yang, S. y Wu, S.J. (2015). Proton accumulation accelerated by heavy chemical nitrogen fertilization and its long-term impact on acidifying rate in a typical arable soil in the Huang-Huai-Hai Plain. *Journal of Integrative Agriculture*, 14: 148–157.

Pilon-Smits, E. (2005). Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, 56: 15-39.

Pineda, H.R. (2004). Presencia de hongos micorrízicos arbusculares y contribución de *Glomus intraradices* en la absorción y translocación de cinc y cobre en girasol (*Helianthus annuus* L.) crecido en un suelo contaminado con residuos de mina (Tesis para doctorado). Universidad de Colima. Tecoman, Colima.

Pourrut, B., Perchet, G., Silvestre, J., Cecchi, M., Guiresse, M. & Pinelli, E. (2008). Potential role of NADPH-oxidase in early steps of lead-induced oxidative burst in *Vicia faba* roots. *Journal of Plant Physiology*, 165(6): 571–579.

Pourrut, B., Shahid, M., Dumat, C., Winterton, P. & Pinelli, E. (2011). Lead uptake, toxicity, and detoxification in plants. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 213: 113-136.

Programa de Hortalizas. (2000). Hortalizas: Datos Básicos. Recuperado el 15 de junio del 2015, de <http://www.lamolina.edu.pe/hortalizas/Publicaciones/Datos%20b%C3%A1sicos/1-Tabla%20de%20contenido.pdf>

Rico Fragozo, K. (2009). Evaluación de rasgos fitotóxicos y bioacumulación de plomo en acelgas (*Beta vulgaris*) y lechugas (*Lactuca sativa* L.) y su efecto generado en la interacción plantas - microorganismos rizosféricos (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Rodríguez, J., Rodríguez, F., Lira R., De la Cerda, JM. y Lara, M., J. (2006). Capacidad de seis especies vegetales para acumular plomo en suelos Contaminados. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29: 239-245.

Rodríguez-Ortiz, J., Valdez-Cepeda, R., Lara, J., Rodríguez, H., Vázquez, R., Magallanes-Quintanar, R., & García-Hernández, J. (2006). Soil Nitrogen fertilization effects on phytoextraction of Cd and Pb by tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). *Bioremediation Journal*, 10:105-114.

Rubio, C., Gutiérrez, A., Martín-Izquierdo, R., Revert, C., Lozano, G. y Hardisson, A. (2004). El plomo como contaminante alimentario. *Revista de Toxicología*, 21: 72-80.

Saadia R., & Ashraf, A. (2013). Comparative evaluation of phytoremediation of metal contaminated soil of firing range by four different plant species. *Arabian Journal of Chemistry*, 89: 101-110.

Sagan, A. (2003). Contaminación por metales. Recuperado el 13 de mayo del 2015, de <http://www.sagan-gea.org/hojared/Hoja19.htm>

Santos Silva, J., Santos Rocha, I., Carvalho, L., Jovita, N. y Carvalho Neta, R. (2015). Principios bioéticos aplicados a los estudios ecotoxicológicos acuáticos. *Revista Bioéctica*, 23(2):416-426

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, [SENAMHI]. (2017), Estación: VON HUMBOLDT. Recuperado el 29 de marzo del 2108 de [https://z/www.senamhi.gob.pe/include\\_mapas/\\_dat\\_esta\\_tipo.php?estaciones=472AC278](https://z/www.senamhi.gob.pe/include_mapas/_dat_esta_tipo.php?estaciones=472AC278)

Sharma, K., Agrawal, M., & Marshall, F. (2008). Heavy metal (Cu, Zn, Cd and Pb) contamination of vegetables in urban India: A case study in Varanasi. *Environmental Pollution*, 15: 254-263.

Shi, Y., Yang, J., Zuo, F., Li, L., Huang, J., Liu T. & Gong, W. (2014). Growth Effects of Pb stress on Seedling of *Lactuca sativa* L. and *Brassica campestris* L.ssp. *Advanced Materials Research*, 886: 309-313.

Sinha, S., Pandey, K., Gupta, A., & Bhatt, K. (2005). Accumulation of metals in vegetables and crops grown in the area irrigated with river water. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 74: 210-218.

Sistema de Información de Precios y Abastecimiento del Sector Agropecuario [SIPSA]. Colombia. (2012). Importancia de los fertilizantes nitrogenados. Recuperado el 12 de junio del 2015 de [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/insumos\\_factores\\_de\\_produccion\\_septiembre\\_2012.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/insumos_factores_de_produccion_septiembre_2012.pdf)

Smolders, E. Oorts K. Peteers S. Lanno, R. & Cheyns, K. (2015). Toxicity in lead salt spiked soils to plants, invertebrates and microbial processes Unraveling effects of acidification, salt stress and ageing reactions. *Science of the Total Environment* 536: 223–231.

Sonbai, JHH., Prajitno, D. & Syukur, A. (2013). Growth and yield of maize on a various application of nitrogen fertilizer in dry land Regosol. *Journal of Agriculture Science*, 16(1): 77-89.

Surya, RE. & Suyono. (2013). Pengaruh pengomposan terhadap rasio C/N kotoran ayam dan kadar hara NPK tersedia serta kapasitas kadar kation tanah (Composting effect of chicken manure towards C/N ratio and available NPK nutrient and soil cation exchange capacity. *Journal of Chemistry*, 2(1): 137- 144.

Tadeo, F., y Gómez-Cadenas, A. (2008). Fisiología de las plantas y el estrés. pp. 577-597.

En: Azcón-Bieto, J. & M. Talón. Fundamentos de fisiología vegetal. 2aEd. McGraw-Hill Interamericana, Madrid.

Tian, T., Ali, B., Qin, Y., Malik, Z., Gill, R.A., Ali, S., & Zhou, W. (2014). Alleviation of lead toxicity by 5-Aminolevulinic acid is related to elevated growth, photosynthesis, and suppressed ultrastructural damages in oilseed rape. *BioMed Research International*, 2014: 1– 11.

Tong, D., & Xu, R. (2012). Effects of urea and (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> on nitrification and acidification of Ultisols from Southern China. *Journal of Environmental Sciences*, 24: 682–689.

Torres, B., y Ramírez A. L.N. (2014). Caracterización de la zona de influencia del cultivo de cebolla larga y la determinación de tasas de usos de agroquímicos en el Lago de Tota (Tesis para título). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia.

Uwah, D., Undie, U., & John, N. (2014). Comparative evaluation of animal manures on soil properties, growth and yield of sweet maize (*Zea mays L. saccharata* Sturt.). *Journal of Agriculture and Environmental Science*, 3(2): 315-331.

Valenzuela, H. (2016). Evaluación del efecto de abonos orgánicos en el cultivo de espinaca (*Spinacea oleracea*), variedades Viroflay, Dash en invernadero del Centro de Investigación y Producción Santo Tomas - Abancay. (Tesis para título). Universidad Tecnológica de los Andes. Apurímac, Perú.

Valdivia, M. (2005). Lead poisoning. *Revista de la Sociedad Peruana de Medicina Interna*, 18: 22-27.

Vega, F., Andrade, M. & Covelo, E. (2010). Influence of soil properties on the sorption and retention of cadmium, copper and lead, separately and together, by 20 soil horizons: comparison of linear regression and tree regression analyses. *Journal of Hazardous Materials*, 174(1–3): 522–533.

Wang, Q., Cui, Y., Liu, X., Dong, Y. & Christie, P. (2003). Soil Contamination and plant Uptake of Heavy Metals Polluted sites in China. *Journal of Environmental Geochemistry and Health*, 38: 823-838.

Wang, H., Shan, X., Wen, B., Owens, G., Fang, J. & Zhang, S. (2007). Effect of indole-3-acetic acid on lead accumulation in maize (*Zea mays* L.) seedlings and the relevant antioxidant response. *Environmental Experimental Botany*, 61(3):246–253.

Whitfield, M., & Zeeb, A. (2010). A review if recent research developments into the potential for phytoextraction of persistent organic pollutants (POPS) from weathered contaminated soil. pp. 35-59. In: Application of phytotechnologies for cleanup of industrial, agricultural and wastewater contamination. Kulakow, P. & Pidlisnuyuk, V. (Ed.). Springer. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security.

Yanqunb, Z., Yuana, L., Jianjunb, Ch., Haiyanb, Q., & Schvartz, C. (2005). Hyperaccumulation of Pb, Zn and Cd in herbaceous grown on lead–zinc mining area in Yunnan, China. *Environment International*, 31: 755– 762.

Yllanez, P., Vélez, A. y Lozano, S. (2014). Efectos fitotóxicos del plomo en maiz híbrido Dekalb (*Zea mays* L.) en suelo arenoso y limoso. *The Biologist (Lima)*, 12: 337-348.

Yuan, N., Pan, W., Zeng, L., Zhang, Q., & Luo, J. (2015). Concentration and transportation of heavy metals in vegetables and risk assessment of human exposure to bioaccessible

heavy metals in soil near a waste-incinerator site, South China. *Science of the Total Environment*, 521–522: 144–151.

Yucra, S., Gasco, M., Rubio, J., y Gonzales, G. F. (2008). Exposición ocupacional a plomo y pesticidas órganofosforados: efecto sobre la salud reproductiva masculina. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 25: 394-402.

Yu-kui, R., Shi-ling, J., Fu-suo, Z., & Jian-bo, Sh. (2009). Effects of nitrogen fertilizer input on the composition of mineral elements in corn grain. *Agrociencia*, 43: 21-27.

Zhao, X. & Xing, G. (2009). Variation in the relationship between nitrification and acidification of subtropical soils as affected by the addition of urea or ammonium sulfate. *Soil Biology & Biochemistry*, 41: 2584–2587.

Zhao, M., Zhang, Ch., Zeng, G., Huang, D. & Cheng, M. (2016). Toxicity and bioaccumulation of heavy metals in *Phanerochaete chrysosporium*. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26: 1410–1418.

**IX. ABREVIATURAS**

F : estadístico de Fisher

has : hectáreas

LMP : límites máximos permisibles

LOEC : Concentración mínima donde se observan efectos progresivos 1negativos respecto al control Pb

N : nitrógeno

ND : no determinado

NOEC : Concentración máxima hasta donde no se observan efectos 1progresivos negativos respecto al control.

p. : nivel de significancia

pH : potencial de hidrógeno

Pb : plomo

t : toneladas

TMF : toneladas métricas finas

T1 : Tratamiento donde se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo

T2 : Tratamiento donde se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo

T3 : Tratamiento donde se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo

T4 : Tratamiento donde se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo

X. ANEXOS

**Tabla Anexo 1.-** Valores de prueba de normalidad mediante el estadístico Shapiro–Wilk para el maíz (Zea mays), la espinaca (Spinacia oleracea) y col (Brassica oleracea var. capitata).

PLANTA	PB FOLIAR (ppm)	P.	N FOLIAR (%)	P.	CLORO-FILA (SPAD)	P.	PESO FRESCO (g)	P.	PESO SECO (g)	P.	MATERIA SECA (%)	P.	ALTURA (cm)	P.	ÁREA FOLIAR (cm <sup>2</sup> )	P.
MAÍZ	0,924	0,22	0,939	0,365	0,884	0,054	0,959	0,671	0,959	0,668	0,789	0,003	0,920	0,190	0,977	0,948
ESPINACA	0,866	0,037	0,858	0,022	0,959	0,684	0,970	0,862	0,916	0,190	0,886	0,071	0,951	0,547	0,979	0,965
COL	0,923	0,414	0,893	0,215	0,824	0,038	0,896	0,228	0,896	0,231	0,878	0,151	0,983	0,976	0,871	0,127

(Pb) Plomo; (N) Nitrógeno; (p.) Nivel de significancia

**Tabla Anexo 2.-** Valores de prueba de homogeneidad de varianza mediante el estadístico Levene para el maíz (Zea mays), la espinaca (Spinacia oleracea) y col (Brassica oleracea var. capitata).

PLANTA	PB FOLIAR (ppm)	P.	N FOLIAR (%)	P.	CLORO-FILA (SPAD)	P.	PESO FRESCO (g)	P.	PESO SECO (g)	P.	MATERIA SECA (%)	P.	ALTURA (cm)	P.	ÁREA FOLIAR (cm <sup>2</sup> )	P.
MAÍZ	0,387	0,814	1,785	0,208	0,293	0,876	0,078	0,987	0,960	0,470	1,183	0,375	0,042	0,996	0,157	0,955
ESPINACA	2,269	0,141	1,075	0,419	0,167	0,950	0,669	0,628	0,455	0,767	2,195	0,150	0,637	0,648	0,594	0,675
COL	0,308	0,746	0,234	0,798	0,384	0,697	1,248	0,352	0,201	0,823	0,510	0,624	0,808	0,489	0,481	0,640

(Pb) Plomo; (N) Nitrógeno; (p.) Nivel de significancia

**Tabla Anexo 3.-** Valores de prueba de normalidad mediante el estadístico Shapiro–Wilk para la raíz el maíz (*Zea mays*), la espinaca (*Spinacia oleracea*) y col (*Brassica oleracea* var. *capitata*).

PLANTA	PESO FRESCO (g)		PESO SECO (g)		MATERIA SECA (%)		LONGITUD (cm)		
	P.		P.		P.		P.		
MAÍZ		0,934	0,317	0,897	0,085	0,972	0,892	0,911	0,140
ESPINACA		0,869	0,033	0,920	0,196	0,976	0,931	0,917	0,174
COL		0,807	0,024	0,959	0,790	0,870	0,123	0,807	0,024

(p.) Nivel de significancia

**Tabla Anexo 4.-** Valores de prueba de homogeneidad de varianza mediante el estadístico Levene para la raíz del maíz (*Zea mays*), la espinaca (*Spinacia oleracea*) y col (*Brassica oleracea* var. *capitata*).

PLANTA	PESO FRESCO (g)		PESO SECO (g)		MATERIA SECA (%)		LONGITUD (cm)		
	P.		P.		P.		P.		
MAÍZ		0,717	0,599	1,174	0,379	1,215	0,364	0,236	0,912
ESPINACA		0,454	0,768	1,063	0,424	0,685	0,619	0,552	0,703
COL		2,625	0,152	0,262	0,778	1,867	0,234	2,625	0,152

(p.) Nivel de significancia

**Tabla Anexo 5.-** Comparación porcentual (%) entre el control y los tratamientos en la estructura foliar del maíz (*Zea mays*).

ESPECIE DE PLANTA	TRATAMIENTO	CLOROFILA	PESO FRESCO	PESO SECO	ALTURA	ÁREA FOLIAR
MAÍZ	T <sub>1</sub>	+ 21,13 %	+ 17,5 %	+ 69,4 %	- 10,44 %	+ 49,66 %
	T <sub>2</sub>	+ 101,82 %	+ 57,29 %	+ 72,04 %	+ 20,86 %	+ 48,47 %
	T <sub>3</sub>	+ 84,97 %	+ 51,22 %	+ 63,54 %	- 12,73 %	+ 60,21 %
	T <sub>4</sub>	+ 80 %	+ 30,16 %	+ 40,85 %	- 24,18 %	- 2,55 %

(+) mayor que el control; (-) menor que el control; (Control) Se aplicó 0 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo; (T<sub>1</sub>) Se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo; (T<sub>2</sub>) Se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0,5 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo; (T<sub>3</sub>) Se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1,0 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo; (T<sub>4</sub>) Se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1,5 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo.

**Tabla Anexo 6.-** Comparación porcentual (%) entre el control y los tratamientos en la estructura foliar de la espinaca (*Spinacia oleracea*).

ESPECIE DE PLANTA	TRATAMIENTO	PB FOLIAR	CLOROFILA	PESO FRESCO	PESO SECO	MATERIA SECA	ÁREA FOLIAR
ESPINACA	T <sub>1</sub>	+ 53,6 %	- 21,6 %	+ 8,33 %	- 16,08 %	+ 361,94 %	+ 40,12 %
	T <sub>2</sub>	+ 105,79 %	+ 36,31 %	+ 53,17 %	+ 38,43 %	+ 196,48 %	+ 29,35 %
	T <sub>3</sub>	+ 135,13 %	+ 9,08 %	- 46,24 %	- 56,75 %	+ 106,83 %	- 19,57 %
	T <sub>4</sub>	+ 260,68 %	- 9,29 %	- 61,63 %	- 60,53 %	+ 44,78 %	- 57,80 %

(+) mayor que el control; (-) menor que el control; (Pb) Plomo; (Control) Se aplicó 0 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo; (T<sub>1</sub>) Se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo; (T<sub>2</sub>) Se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0,5 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo; (T<sub>3</sub>) Se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1,0 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo; (T<sub>4</sub>) Se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1,5 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo.

**Tabla Anexo 7.-** Comparación porcentual (%) entre el control y los tratamientos en la estructura foliar de la col (*Brassica oleracea* var. capitata).

ESPECIE DE PLANTA	TRATAMIENTO	N FOLIAR	CLOROFILA
COL	T <sub>1</sub>	+ 5,78 %	+ 0,88 %
	T <sub>2</sub>	- 13,72 %	+ 23,78 %

(+) mayor que el control; (-) menor que el control; (N) nitrógeno; (Control) Se aplicó 0 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo; (T<sub>1</sub>) Se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo; (T<sub>2</sub>) Se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0,5 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo.

**Tabla Anexo 8.-** Comparación porcentual (%) entre el control y los tratamientos en la raíz del maíz (*Zea mays*).

ESPECIE DE PLANTA	TRATAMIENTO	PESO FRESCO
MAÍZ	T <sub>1</sub>	- 4,25 %
	T <sub>2</sub>	- 31,93 %
	T <sub>3</sub>	+ 27,67 %
	T <sub>4</sub>	- 53,19 %

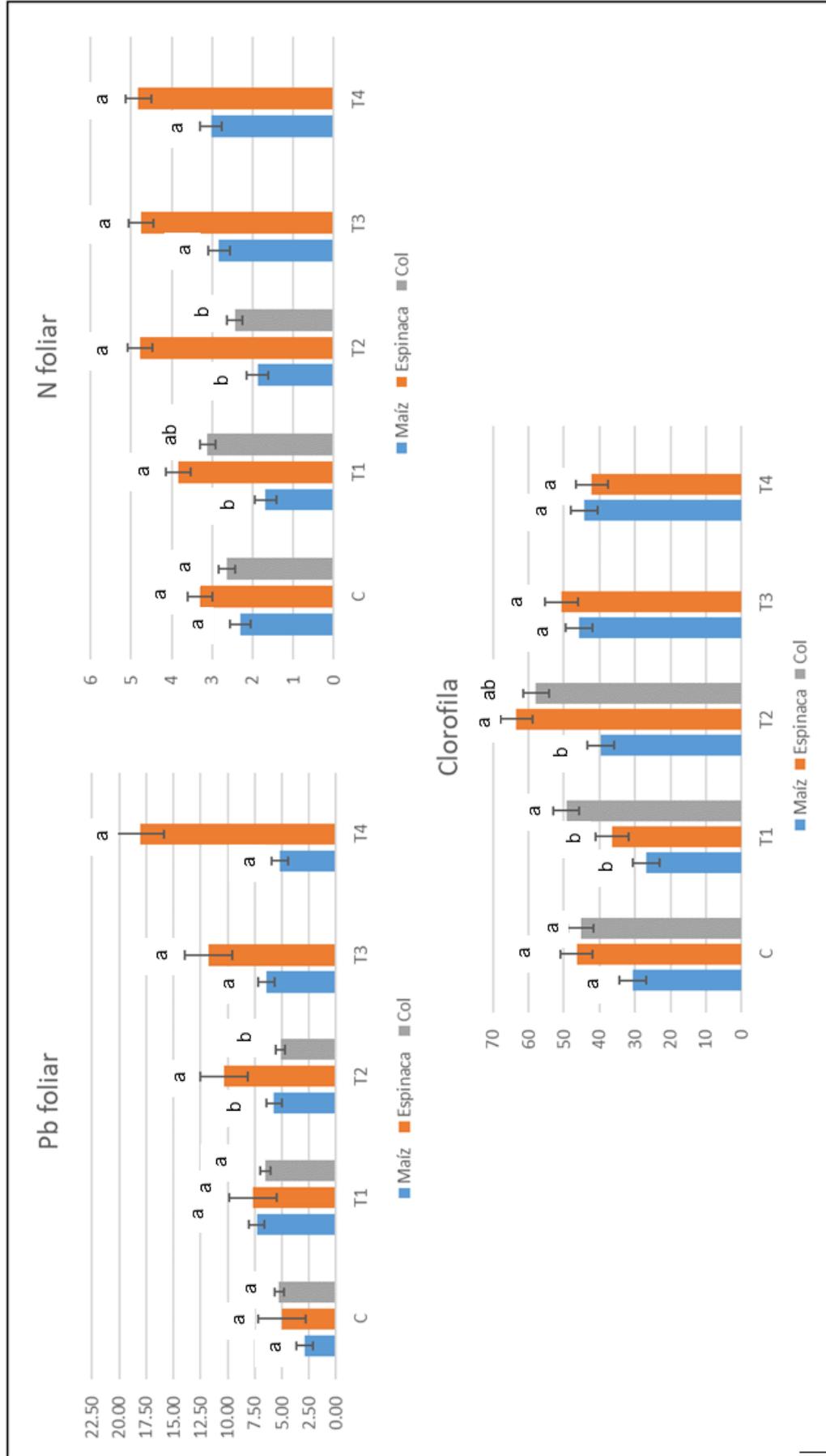
(+) mayor que el control; (-) menor que el control; (Control) Se aplicó 0 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo; (T<sub>1</sub>) Se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo; (T<sub>2</sub>) Se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0,5 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo; (T<sub>3</sub>) Se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1,0 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo; (T<sub>4</sub>) Se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1,5 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo.

**Tabla Anexo 9.-** Comparación porcentual entre el control (%) y los tratamientos en la raíz de la espinaca (*Spinacia oleracea*).

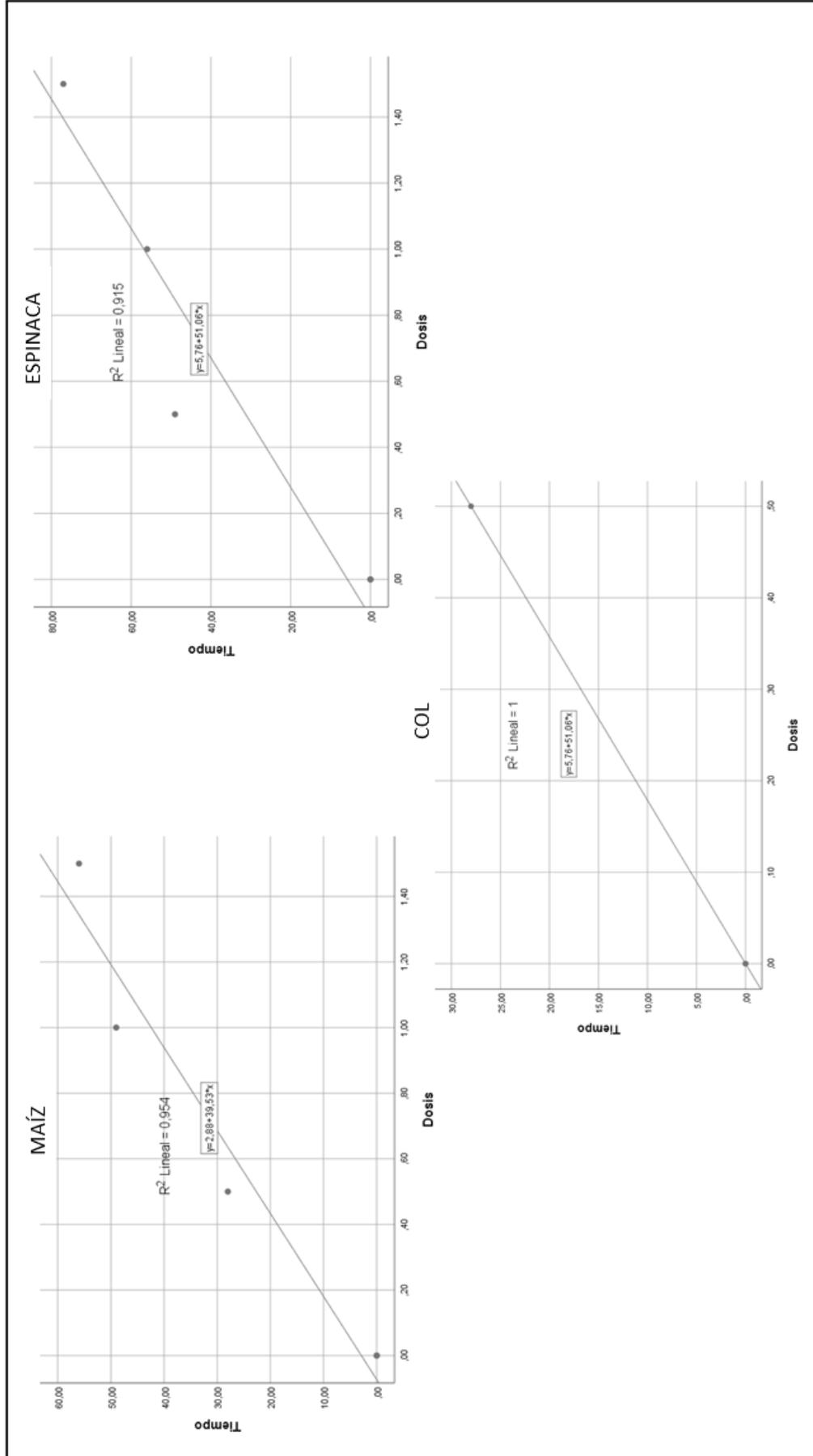
ESPECIE DE PLANTA	TRATAMIENTO	PESO FRESCO	PESO SECO	MATERIA SECA	LONGITUD
ESPINACA	T <sub>1</sub>	+ 206,85 %	+ 127,87 %	- 28,48 %	+ 361,94 %
	T <sub>2</sub>	+ 128,48 %	+ 72,13 %	- 26,24 %	+ 189,56 %
	T <sub>3</sub>	+ 7,07 %	- 51,64 %	- 56,66 %	+ 106,83 %
	T <sub>4</sub>	- 35,76 %	- 70,05 %	- 61,98 %	+ 44,78 %

(+) mayor que el control; (-) menor que el control; (Pb) Plomo; (Control) Se aplicó 0 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo; (T<sub>1</sub>) Se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo; (T<sub>2</sub>) Se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 0,5 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo; (T<sub>3</sub>) Se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1,0 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo; (T<sub>4</sub>) Se aplicó 0,5 g Pb•kg<sup>-1</sup> de suelo y 1,5 g urea•kg<sup>-1</sup> de suelo.

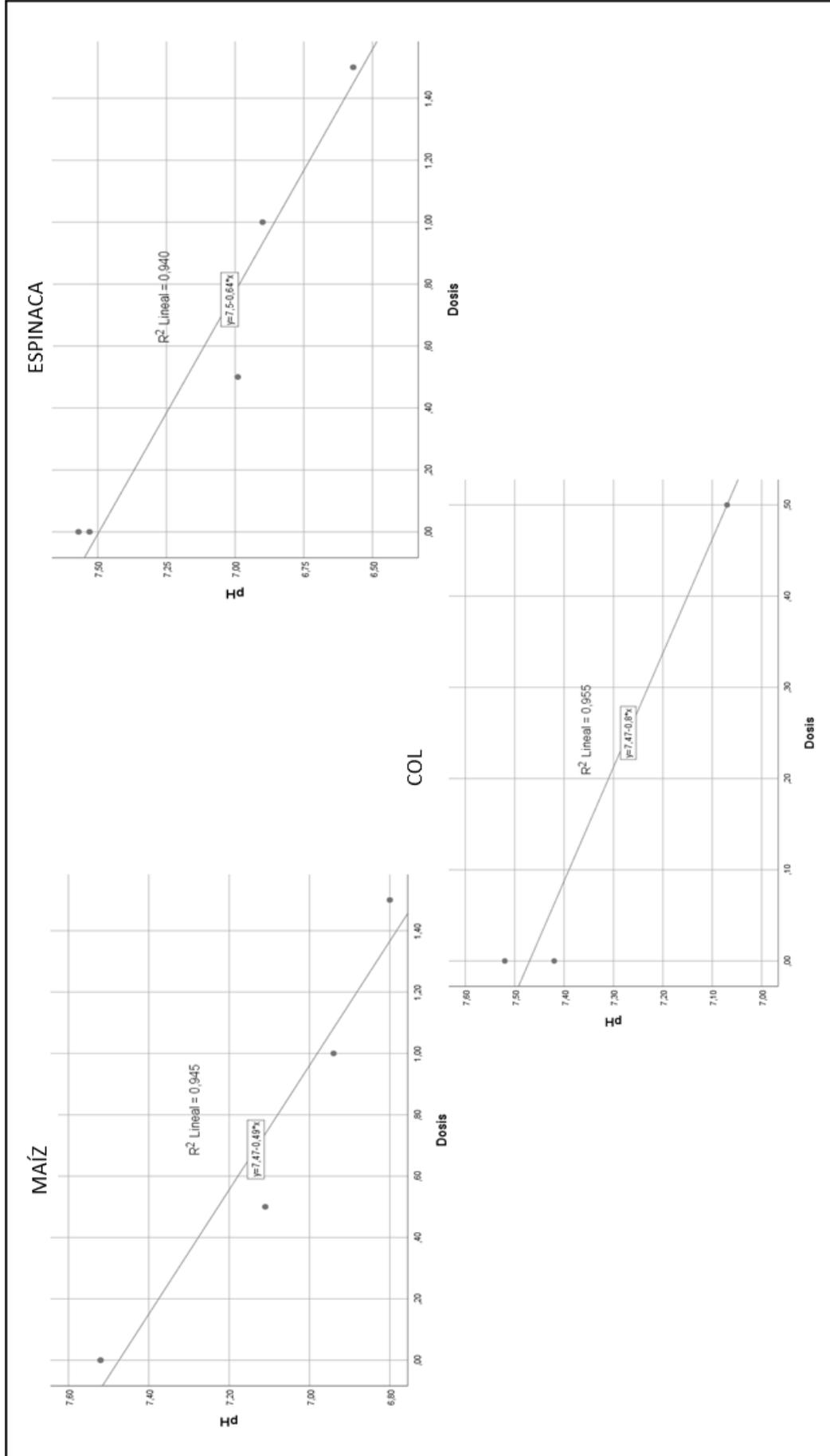
**Figura Anexo 10.-** Comparación del efecto progresivo de la urea y del plomo en tres variables de la estructura foliar entre el maíz (*Zea mays*), la espinaca (*Spinacia oleracea*) y col (*Brassica oleracea* var. *capitata*) para cada uno de los tratamientos en forma individualizada.



**Figura Anexo 11.-** Gráfica de regresión lineal y coeficiente de determinación ( $R^2$ ) entre la dosis de urea y el tiempo de acidez del maíz (*Zea mays*), la espinaca (*Spinacia oleracea*) y col (*Brassica oleracea var. capitata*).



**Figura Anexo 12.-** Gráfica de regresión lineal y coeficiente de determinación ( $R^2$ ) entre la dosis de urea y el pH del suelo del maíz (*Zea mays*), la espinaca (*Spinacia oleracea*) y col (*Brassica oleracea var. capitata*).



**Figura Anexo 13.-** Gráfica de regresión lineal y coeficiente de determinación ( $R^2$ ) entre el pH del suelo y el Pb foliar del maíz (*Zea mays*), la espinaca (*Spinacia oleracea*) y col (*Brassica oleracea var. capitata*).

