

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
FACULTAD DE CIENCIAS FARMACEUTICAS, BIOQUIMICAS Y
BIOTECNOLOGICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA BIOTECNOLOGICA



**“ESTUDIO COMPARATIVO DE LA CAPACIDAD DE ACUMULACIÓN PARA
CADMIO Y PLOMO DE *Scirpus californicus* (Totor) Y *Stypa ichu* (Ichu)
BAJO CONDICIONES HIDROPÓNICAS”**

Trabajo de Investigación presentado por los Bachilleres:

DIAZ HOYOS LUDWIG MANUEL

PERALTA RODRIGUEZ LIZETTE ROSSANA

Para optar el Título Profesional de

INGENIERO BIOTECNÓLOGO

Asesor:

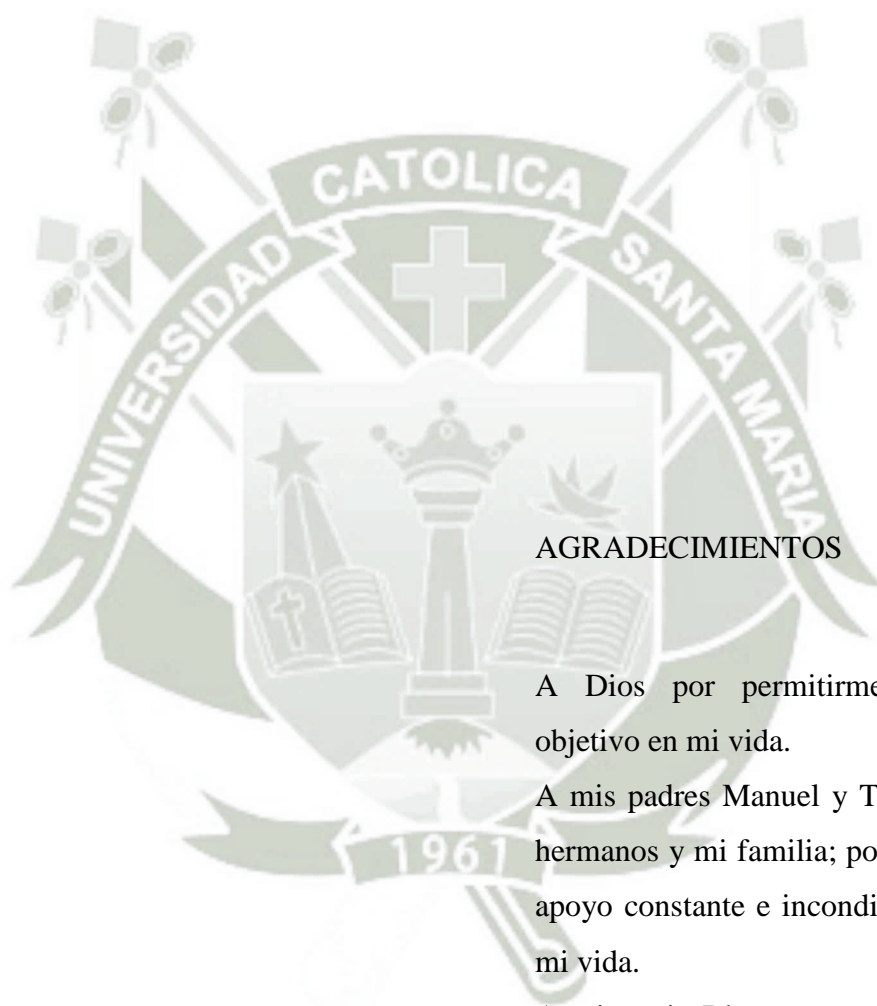
Dr. José Antonio Villanueva Salas - UCSM

AREQUIPA – PERÚ
2017



AGRADECIMIENTO ESPECIAL

Al Dr. Mauro Quiñónez Aguilar por su paciencia, aporte de valiosos conocimientos de los cuales se nutrió el presente trabajo, por su apoyo incondicional y consejo en el desarrollo de la tesis, que sin él no hubiera sido posible llevarlo a cabo.



AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme lograr este objetivo en mi vida.

A mis padres Manuel y Teolinda, a mis hermanos y mi familia; por ser fuente de apoyo constante e incondicional en toda mi vida.

A mi novia Blanca por ser mi amiga y compañera incondicional, por creer en mí, animarme y ayudarme a alcanzar mis objetivos en la realización de este proyecto.



AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su paciencia y aliento.

A mi esposo Erick por su gran amor, ayuda y estar siempre a mi lado en cada paso.

A mis hermanos Gerald y Marcela por sus palabras.



DEDICATORIA

Este trabajo de investigación está dedicado a mi madre porque nunca perdió su fe en mí, a mi padre por haberme enseñado como ser un buen profesional. Por ser mi mayor motivación de superación para ser mejor cada día.



DEDICATORIA

Este trabajo de investigación está dedicado a mis padres que siempre estuvieron a mi lado en cada paso, a mi esposo por ser mi apoyo incondicional y a mi hermano que a la distancia me dio toda la fuerza y valor necesario para continuar.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	vii
RESUMEN	xvi
PALABRAS CLAVE	xvi
ABSTRACT	xvii
KEY WORDS	xvii
GLOSARIO	xviii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
HIPÓTESIS	3
CAPÍTULO I: MARCO TEORICO	4
1.1. Los Metales Pesados.....	4
1.1.1. El Cadmio.....	6
1.1.2. El Plomo.....	7
1.2. Contaminación Provocada por Efluentes Mineros en el Medio Ambiente.....	8
1.3. Contaminación Provocada por Residuos Industriales (RI).....	9
1.4. Efectos de la Contaminación.....	9
1.4.1. Suelos.....	9
1.4.2. Aguas.....	10
1.4.3. Plantas.....	11

1.5. Estudios de Plomo y Cadmio.....	12
1.5.1. En Suelos.....	12
1.5.2. En Aguas.....	13
1.6. Fitorremediación.....	13
1.7. Características de las plantas en estudio.....	17
1.7.1. Totora(<i>Scirpus californicus</i>).....	17
a. Generalidades.....	17
b. Nombre Científico.....	18
c. Familia.....	18
d. Descripción Botánica.....	18
e. Inflorescencia.....	20
f. Hábitat.....	20
g. Descripción de uso y palatabilidad.....	21
h. Valor nutricional.....	21
i. Beneficios que Proporciona la Totora	21
1.7.2. Ichu (<i>Stipa Ichu</i>).....	22
a. Generalidades.....	22
b. Nombre Científico.....	22
c. Familia.....	22
d. Descripción Botánica.....	22
e. Hábitat.....	22
f. Descripción de uso y palatabilidad.....	22
g. Valor Nutricional.....	23
h. Beneficios que Proporciona el Ichu.....	23
1.7.3. Resistencia y Adaptabilidad a Sistemas Hidropónicos y Descontaminación de Metales Pesados en Totora e Ichu.....	23
CAPÍTULO II: MATERIALES Y METODOS.....	24
2.1. MATERIALES.....	24
2.1.1. Materiales de Vidrio.....	24

2.1.2. Material Biológico.....	24
2.1.3. Equipos.....	24
2.1.4. Materiales Químicos.....	24
2.1.5. Otros.....	25
2.2. METODOLOGÍA.....	25
2.2.1. Recolección de plantas Altoandinas <i>Stipa ichu</i> (Ichu) y <i>Scirpus californicus</i> (Totora).....	25
a. Recolección de <i>Stipa Ichu</i> (Ichu).....	25
b. Recolección de <i>Scirpus californicus</i> (Totora).....	26
2.2.2. Cultivo en sistema hidropónico.....	27
a. Instalación y acondicionamiento de un invernadero para el desarrollo del sistema hidropónico.....	27
b. Preparación del medio de cultivo hidropónico.....	28
c. Desarrollo del Sistema Hidropónico.....	32
2.2.3. Adaptación de plantas de <i>Stipa Ichu</i> (Ichu) al medio de cultivo hidropónico...35	
2.2.4. Determinación de pH.....	36
2.2.5. Determinación de Temperatura.....	38
2.2.6. Determinación del consumo de medio de cultivo en el tiempo de experimentación.....	40
2.2.7. Determinación de metales pesados por espectrofotometría de absorción atómica.....	41
a. Equipo.....	41
b. Reactivos.....	41
c. Procedimiento.....	43
d. Cálculos.....	45
2.2.8. Método estadístico: Análisis de Varianza para un factor (ANOVA).....	45
a. Para Concentraciones.....	46
b. Para plantas (tallos/raíces).....	46
c. Para Aditividad (interacción).....	46

CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47
3.1 Recolección de plantas Altoandinas <i>Stipa ichu</i> (Ichu) y <i>Scirpus californicus</i> (Totora).....	47
3.1.1. Resultados.....	47
3.1.2. Discusión.....	47
3.2 Aclimatación de plantas de <i>Stipa Ichu</i> (Ichu) al medio de cultivo hidropónico.....	47
3.2.1. Resultados.....	47
3.2.2. Discusión.....	48
3.3 Determinación del consumo de medio de cultivo en el tiempo de experimentación.....	48
3.3.1 Resultados.....	48
3.3.2 Discusión.....	50
3.4 Determinación de metales pesados por Absorción Atómica.....	50
3.4.1 Resultados.....	50
3.4.2 Discusión.....	60
3.5 Método estadístico ANOVA.....	61
3.5.1 Resultados.....	61
3.5.2 Discusión.....	80
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES.....	84
CAPITULO V: RECOMENDACIONES.....	85
5.1 Sobre recolección de material biológico.....	85
5.2 Sobre construcción de invernadero.....	85
5.3 Sobre preparación de medios.....	85
5.4 Sobre comportamiento de las plantas.....	85
5.5 Sobre Resultados.....	86
REFERENCIAS.....	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°01	Ventajas y Desventajas de la Fitorremediación.....	16
Tabla N°02	Fórmula Solución Hidropónica Concentrada UNALM.....	28
Tabla N°03	Fórmula Solución Hidropónica Nutritiva UNALM.....	31
Tabla N°04	Registro semanal de pH tomado durante el experimento	37
Tabla N°05	Registro diario de temperatura ambiental tomado en el invernadero durante el desarrollo del experimento	39
Tabla N°06	Registro de consumo de solución hidropónica por bandeja de experimentación.....	40
Tabla N°07	Registro del consumo semanal de solución hidropónica por bandeja de experimentación.....	49
Tabla N°08	Resultados de las pruebas de absorción atómica realizados a las plantas de Totora.....	51
Tabla N°09	Resultados de las pruebas de absorción atómica realizados a las plantas de Ichu.....	52
Tabla N°10	Prueba de ANOVA para la Determinación de la Relación entre las Concentraciones de Pb en Tallos de Totora e Ichu.....	62
Tabla N°11	Prueba de ANOVA para la Determinación de la Relación entre las Concentraciones de Pb en Raíces de Totora e Ichu.....	63
Tabla N°12	Prueba de ANOVA para la Determinación de la Relación entre las Concentraciones de Cd en Tallos de Totora e Ichu.....	64
Tabla N°13	Prueba de ANOVA para la Determinación de la Relación entre las Concentraciones de Cd en raíces de Totora e Ichu.....	65
Tabla N°14	Prueba de ANOVA para la Determinación de la Relación entre las Concentraciones de Pb en Muestras de Cd/Pb en Tallos de Totora e Ichu.....	66
Tabla N°15	Prueba de ANOVA para la Determinación de la Relación entre las Concentraciones de Pb en Muestras de Cd/Pb en Raíces de Totora e Ichu.....	67
Tabla N°16	Prueba de ANOVA para la Determinación de la Relación entre las Concentraciones de Cd en Muestras de Cd/Pb en Tallos de Totora e Ichu.....	68

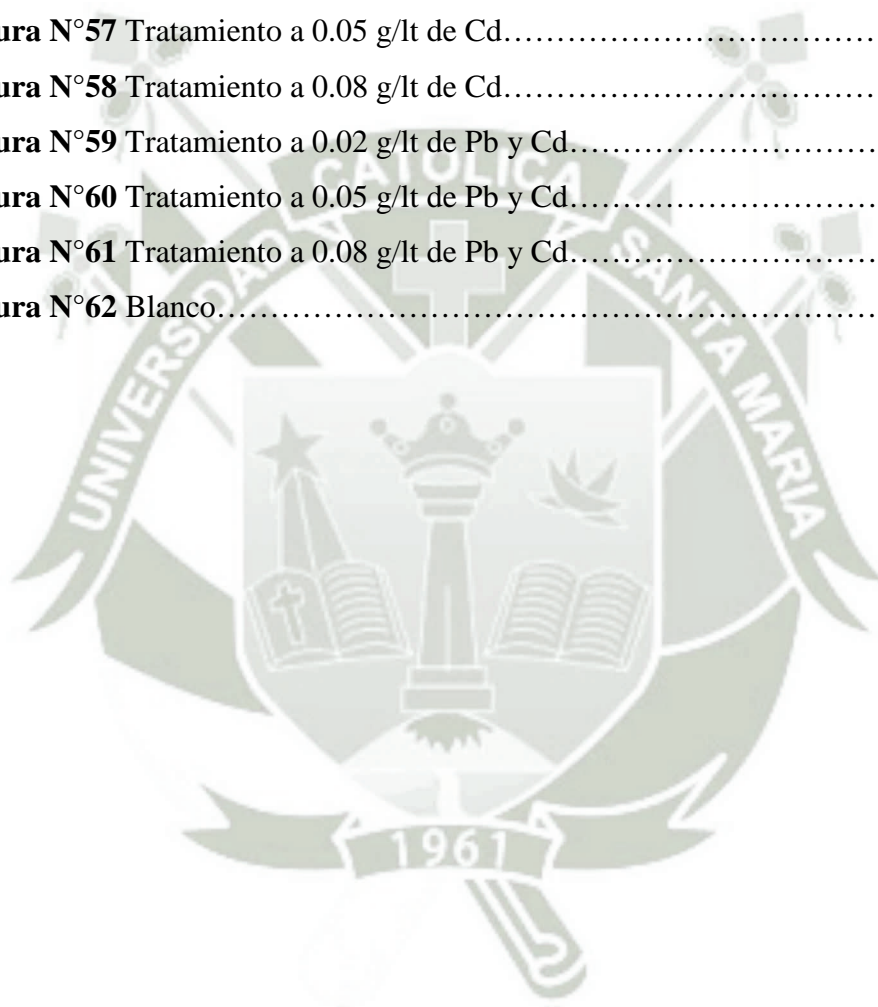
Tabla N°17 Prueba de ANOVA para la Determinación de la Relación entre las Concentraciones de Cd en Muestras de Cd/Pb en raíces de Totora e Ichu.....	69
Tabla N°18 Promedios acumulados de retención de metales pesados en Totora e Ichu.....	70
Tabla N°19 Porcentaje de retención de Pb medido por absorción atómica en Totora e Ichu, analizados en tallos.....	71
Tabla N°20 Porcentaje de retención de Pb medido por absorción atómica en Totora e Ichu, analizados en raíces.....	71
Tabla N°21 Porcentaje de retención de Cd medido por absorción atómica en Totora e Ichu, analizados en tallos.....	73
Tabla N°22 Porcentaje de retención de Cd medido por absorción atómica en Totora e Ichu, analizados en raíces.....	73
Tabla N°23 Porcentaje de retención de Pb en medio conteniendo Cd y Pb medido por absorción atómica en Totora e Ichu, analizados en Tallos.....	75
Tabla N°24 Porcentaje de retención de Pb en medio conteniendo Cd y Pb medido por absorción atómica en Totora e Ichu, analizados en Raíces.....	75
Tabla N°25 Porcentaje de retención de Cd en medio conteniendo Cd y Pb medido por absorción atómica en Totora e Ichu, analizados en Tallos.....	77
Tabla N°26 Porcentaje de retención de Cd en medio conteniendo Cd y Pb medido por absorción atómica en Totora e Ichu, analizados en Raíces.....	77
Tabla N°27 Porcentaje de retención de metales pesados agrupados por planta evaluada, Totora.....	79
Tabla N°28 Porcentaje de retención de metales pesados agrupados por planta evaluada, Ichu.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°01 Fase inicial y final del experimento completo del cultivo hidropónico en Totora.....	54
Figura N°02 Fase inicial y final del cultivo de Totora contaminado con Pb.....	55
Figura N°03 Fase inicial y final del cultivo de Totora contaminado con Cd.....	56
Figura N°04 Fase inicial y final del cultivo de Totora contaminado con Pb/Cd.....	57
Figura N°05 Fase inicial y final del cultivo hidropónico de Ichu con Pb.....	58
Figura N°06 Fase inicial y final del cultivo hidropónico de Ichu con Cd.....	59
Figura N°07 Fase inicial y final del cultivo hidropónico de Ichu con Pb/Cd.....	60
Figura N°08 Porcentaje de Retención de Pb en tallos y raíces de Totora.....	72
Figura N°09 Porcentaje de Retención de Pb en tallos y raíces de Ichu.....	72
Figura N°10 Porcentaje de Retención de Cd en tallos y raíces de Totora.....	74
Figura N°11 Porcentaje de Retención de Cd en tallos y raíces de Ichu.....	74
Figura N°12 Porcentaje de Retención de Pb en medio conteniendo Cd y Pb en tallos y raíces de Totora.....	76
Figura N°13 Porcentaje de Retención de Pb en medio conteniendo Cd y Pb en tallos y raíces de Ichu.....	76
Figura N°14 Porcentaje de Retención de Cd en medio conteniendo Cd y Pb en tallos y raíces de Totora.....	78
Figura N°15 Porcentaje de Retención de Cd en medio conteniendo Cd y Pb en tallos y raíces de Ichu.....	78
Figura N°16 Zona de Recolección La Oroya.....	94
Figura N°17 Zona de Recolección La Oroya.....	94
Figura N°18 Procedimiento de Recolección de Plantas de Ichu.....	95
Figura N°19 Procedimiento de Recolección de Plantas de Ichu.....	95
Figura N°20 Retiro de Planta de Ichu de su Medio Natural.....	96
Figura N°21 Bandejas con Muestras de Ichu Recolectadas.....	96
Figura N°22 Zona de Recolección de plantas de Totora. Zona cercana a Pantanos de Villa.....	97

Figura N°23 Zona de Recolección de plantas de Totora. Zona cercana a Pantanos de Villa.....	97
Figura N°24 Selección de Plantas Jóvenes de Totora.....	98
Figura N°25 Selección de Plantas Jóvenes de Totora.....	98
Figura N°26 Colocación de Malla Ratschel.....	99
Figura N°27 Esquinas Superiores del Invernadero, Reforzadas con Nylon y Atados a la Malla.....	99
Figura N°28 Colocación del Suelo Plastificado.....	100
Figura N°29 Invernadero Listo para la Instalación de los Sistemas Hidropónico.....	100
Figura N°30 Soluciones Patrón A y B.....	101
Figura N°31 Preparación de Medio de Cultivo con Soluciones Patrón.....	101
Figura N°32 Preparación de Medio de Cultivo con Soluciones Patrón.....	102
Figura N°33 Preparación de Medio de Cultivo. Mezclando Soluciones Patrón.....	102
Figura N°34 Lavado de Bandejas.....	103
Figura N°35 Medio de Cultivo antes de Repartir por Bandejas.....	103
Figura N°36 Bandeja con Medio de Cultivo.....	104
Figura N°37 Bandejas con Medio de Cultivo, Tapada para Evitar Contaminantes...	104
Figura N°38 Bandejas con Diferentes Concentraciones de Medio de Cultivo Hidropónico.....	105
Figura N°39 Tubos de Oxigenación de las Bandejas.....	106
Figura N°40 Bandejas Cubiertas con Cartulina Negra.....	106
Figura N°41 Primera Semana de Adaptación.....	107
Figura N°42 Segunda Semana de Adaptación.....	107
Figura N°43 Tratamiento a 0.02 g/lit de Pb.....	109
Figura N°44 Tratamiento a 0.05 g/lit de Pb.....	110
Figura N°45 Tratamiento a 0.08 g/lit de Pb.....	111
Figura N°46 Tratamiento a 0.02 g/lit de Cd.....	112
Figura N°47 Tratamiento a 0.05 g/lit de Cd.....	113
Figura N°48 Tratamiento a 0.08 g/lit de Cd.....	114
Figura N°49 Tratamiento a 0.02 g/lit de Pb y Cd.....	115

Figura N°50 Tratamiento a 0.05 g/lit de Pb y Cd.....	116
Figura N°51 Tratamiento a 0.08 g/lit de Pb y Cd.....	117
Figura N°52 Blanco.....	118
Figura N°53 Tratamiento a 0.02 g/lit de Pb.....	119
Figura N°54 Tratamiento a 0.05 g/lit de Pb.....	120
Figura N°55 Tratamiento a 0.08 g/lit de Pb.....	121
Figura N°56 Tratamiento a 0.02 g/lit de Cd.....	122
Figura N°57 Tratamiento a 0.05 g/lit de Cd.....	123
Figura N°58 Tratamiento a 0.08 g/lit de Cd.....	124
Figura N°59 Tratamiento a 0.02 g/lit de Pb y Cd.....	125
Figura N°60 Tratamiento a 0.05 g/lit de Pb y Cd.....	126
Figura N°61 Tratamiento a 0.08 g/lit de Pb y Cd.....	127
Figura N°62 Blanco.....	128



RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio comparativo de la capacidad de acumulación para cadmio y plomo de *Scirpus Californicus* (Tatora) y *Stipa Ichu* (Ichu) bajo condiciones hidropónicas.

El objetivo fue evaluar la capacidad de retención de Pb, Cd y Pb/Cd juntos en 2 tipos de muestra, i) raíces y ii) hojas y tallos, de las especies antes mencionadas y a diferentes concentraciones (20, 50 y 80 ppm) para conocer la eficacia en los medios contaminados con estos metales como también determinar en qué parte de las plantas existe mayor retención.

Los resultados obtenidos, por medio de la técnica de espectrofotometría de absorción atómica, indican que la retención de Pb fue mejor en Tatora a una concentración de 20 ppm llegando a retener 5.924 % (1.185 ppm) de la concentración. El Ichu en un sistema hidropónico presenta características pobres para la acumulación de Pb y Cd generando bajos niveles de acumulación.

PALABRAS CLAVE

Fitorremediación, Ichu, *Stipa Ichu*, Tatora, *Scirpus Californicus*, metales pesados, plomo (Pb), cadmio (Cd).

ABSTRACT

This paper presents a study comparing the phythoremediating capacity and retention of lead and cadmium in *Stipa Ichu* (Ichu) and *Scirpus californicus* (Totora) in a hydroponic medium.

The objective was to evaluate the retention capacity of Pb, Cd and Pb/Cd together in 2 types of sample, i) roots and ii) leaves and stems, of the species listed above and at different concentrations (20, 50 and 80 ppm) and to determine the effectiveness in contaminated soils with these metals as determine what part of the plant there is greater retention.

The results obtained using the technique of atomic absorption spectrophotometry indicate that retention of Pb was better in Totora at a concentration of 20 ppm coming to hold 5,924% (1.185 ppm) of the concentration. The Ichu in a hydroponic system has poor features accumulation of Pb and Cd accumulation generating low.

KEY WORDS

Fitorremediación, Ichu, *Stipa Ichu*, Totora, *Scirpus Californicus*, heavy metals, lead (Pb), Cadmium (Cd).

GLOSARIO

- **Actinomorfo:** Que tiene simetría radial.
- **Altoandino:** Localizado en zonas altas de los Andes.
- **Androceo:** En botánica referido a la estructura reproductora masculina.
- **Antropogénica:** Que derivan de residuos peligrosos procedentes de actividades industriales, minería, industria agrícola y RSU.
- **Apoplasto:** Espacio extracelular periférico al plasmalema de las células vegetales por el que fluyen agua y otras sustancias.
- **Bráctea:** Hoja que nace del pedúnculo de una flor o de la rama de una inflorescencia y que se diferencia de las hojas propiamente dichas por su tamaño, color y forma.
- **Deflación:** Se produce cuando el viento levanta los fragmentos sueltos del suelo. Este proceso actúa donde la superficie del terreno está completamente seca y recubierta de pequeños granos de arena sueltos.
- **DHHS:** De las siglas en inglés, “Department of Health and Human Services”, Departamento de Salud y Servicios Sociales de los Estados Unidos.
- **DIGESA:** Dirección General de Salud Ambiental.
- **DREM:** Dirección Regional de Energía y Minas.
- **DS-010-2010-MINAM:** Decreto Supremo que Aprueba los Límites Máximo Permisibles (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas.
- **Elemento traza:** Elemento cuya concentración es menor a 1000 ppm o menor a 0.1% de la composición de una roca (en geoquímica). Compuesto químico que es necesario en cantidades ínfimas para el crecimiento, desarrollo y fisiología de un organismo (en bioquímica).
- **EPA:** De las siglas en inglés, “Environmental Protection Agency”, Agencia de protección Ambiental.

- **Espectrofotometría de absorción atómica:** Técnica de determinación química utilizada para la detección de metales presentes en muestras orgánicas e inorgánicas.
- **Espiciforme:** Que tiene forma de espiga.
- **FDA:** De las siglas en inglés, “Food and Drugs Administration”, Administración de Alimentos y Medicamentos.
- **Fitorremediación:** Remediación de suelo, aire o agua contaminado, por medio de la utilización de plantas.
- **Galvanoplastia:** Deposición mediante electricidad, o electrodeposición. Traslado de iones metálicos desde un ánodo a un cátodo, donde se depositan, en un medio líquido acuoso.
- **Geogénica:** Que procede de la roca madre, actividad volcánica o de la lixiviación de mineralizaciones.
- **Glumas:** Vainas estériles, externas, basales y membranosas presentes en plantas gramíneas y ciperáceas.
- **Hidroponía:** Método utilizado para cultivar plantas usando soluciones minerales disueltas en agua que contienen todos los elementos químicos esenciales para su desarrollo.
- **Inorgánico:** Compuestos formados por distintos elementos y que por lo general no contienen carbono. (CO₂ contiene carbono pero es considerado inorgánico porque carece de la molécula de hidrogeno).
- **INRENA:** Instituto Nacional de Recursos Naturales.
- **Jales:** Relaves.
- **Lema:** bráctea inferior, membranosa, de las dos que se encuentran en la flor de las gramíneas; también se denomina glumela inferior.
- **LMP o LMPs:** Límite o Límites Máximo Permisibles.
- **Metales pesados:** Metales de alto peso molecular, entre 63.55 (Cu) y 200.59 (Hg).
- **MINSA:** Ministerio de Salud.
- **Orgánico:** Sustancia química que contiene carbono.

- **OSHA:** De las siglas en inglés, “Occupational Safety and Health Administration”, Administración de Seguridad y Salud Ocupacional.
- **Papus:** Conjunto de pelos simples o plumosos, cerdas o escamas que rodean a las diminutas flores que corona en frutos con ovario que se desarrolla por debajo de los verticilos.
- **Perigonio:** Envoltura de los órganos sexuales de la planta.
- **Pesticida:** Sustancia química empleada para controlar o combatir algunos seres vivos considerados como plagas.
- **PPM:** Partes Por Millón, (mg/L).
- **Pubescente:** Cualquier órgano vegetal o conjunto que presenta su superficie vellosa, cubierta de pelos finos y suaves.
- **Radioactivo:** Que emite radiación.
- **Radionucleótidos:** Elementos químicos con configuración inestable que experimentan una desintegración radiactiva que se manifiesta en la emisión de radiación en forma de partículas alfa o beta y rayos X o gama.
- **Relaves:** Desechos tóxicos subproductos de procesos mineros y concentración de minerales, usualmente una mezcla de tierra, minerales, agua y rocas.
- **RSU:** Residuos Sólidos Urbanos.
- **Sépalos:** Pieza floral que forma el cáliz de una flor en una planta angiosperma.
- **Umbela:** Inflorescencia en que los racimos arrancan de un mismo punto y se elevan a igual altura, formando una especie de paraguas.
- **Verticilos:** Conjunto de tres o más hojas que brotan de un tallo en el mismo nudo aparente.
- **Volatilizar:** Pasar del estado líquido a gaseoso.
- **Volutas:** Tipo de disposición de los primordios foliares dentro de la yema, en donde el primordio conforma una estructura rígida.

INTRODUCCIÓN

La concentración de metales pesados puede ser de naturaleza geogénica, que refiere a origen natural o antropogénica, provocada por las actividades del hombre.

La contaminación antropogénica se da cuando la concentración del metal es mayor que la correspondiente a la composición geoquímica del medio como resultado de las actividades industriales, mineras y agrícolas.

- **Actividades Industriales:** Se puede dar por vía aérea a través de material articulado y emisiones gaseosas proveniente de las fundiciones y del transporte, como también, a través de las aguas residuales.
- **Actividades Agrícolas:** Se puede ser por vía aérea, fertilizantes minerales, plaguicidas, lodos de aguas residuales o servidas.
- **Actividades Mineras:** Producen contaminantes que afectan el suelo y el aire, estos pueden generarse por los drenajes de las minas como también por los relaves. Algunos metales, entre estos, Pb y Cd son altamente tóxicos, incluso en pequeñas cantidades sobre todo si se encuentran en forma soluble. Los metales pesados, al acumularse en el suelo, descienden hacia aguas subterráneas contaminando flora y fauna en zonas aledañas.

La remediación de suelos y aguas por métodos fisicoquímicos encarecen el costo del proceso de descontaminación ambiental, es por esta razón, que se han buscado nuevas alternativas, como la fitorremediación. La aplicación de esta tecnología genera una reducción de los costos de inversión en el saneamiento de los efluentes que contaminan aguas subterráneas y suelos.

Mediante la fitorremediación de metales pesados es posible establecer un proceso de recuperación de los mismos para poder concentrarlos y reutilizarlos en la industria. La fitorremediación se basa en la utilización de plantas para recuperar suelos y efluentes líquidos contaminados con metales pesados por la capacidad con la que cuentan las

plantas fitorremediadoras para absorber, retener o volatilizar estos metales de manera que los suelos y consecuentemente los efluentes líquidos puedan ser remediados.

En este estudio se ha sometido a evaluación dos plantas altoandinas *Stipa ichu* (Ichu) y *Scirpus californicus* (Totorá):

- *Stipa ichu*: Conocida comúnmente como Ichu, es un pasto que crece en la altura, el cual sirve como alimento de animales de pastoreo. Al estar en zonas altoandinas también está sometida a climas extremos y suelos con cargas metálicas altas lo cual hace que sea un buen candidato para un estudio de fitorremediación, como también para evaluar los niveles de concentración de metales pesados acumulados en los segmentos analizados.
- *Scirpus californicus*: Conocida comúnmente como Totorá, es una planta que crece de manera silvestre, desde la costa hasta la sierra. Esta planta ha sido utilizada como fitorremediadora en sistemas de tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, como también ha sido objeto de estudio por la capacidad que posee para absorber metales pesados.

Al analizar la capacidad de retención de los metales pesados en estudio en estas especies se podrá realizar una comparación entre ellas respecto a su capacidad acumuladora de manera que se pueda seleccionar aquellas que presenten mejores características para su aplicación en campo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio comparativo de la capacidad de acumulación de cadmio (Cd) y plomo (Pb) en *Scirpus californicus* (Totora) y *Stipa ichu* (Ichu) bajo condiciones hidropónicas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la respuesta morfofisiológica de las plantas altoandinas en estudio frente a la exposición de Cd y Pb.
- Evaluar la concentración de Pb y Cd presentes en las raíces y tallos de las plantas en estudio.
- Determinar la especie altoandina con mejor capacidad de acumulación y menor daño producido durante su exposición a los metales pesados.

HIPÓTESIS

Dado que las plantas a evaluar presentan características de buen crecimiento en zonas altas y son potencialmente aceptables para la acumulación de metales pesados, es posible que reduzcan la concentración presente en el medio de cultivo hidropónico.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.

1.1. Los Metales Pesados.

De acuerdo a Kabata-Pendias *et al.*, 1995 las trazas de metales pesados en los suelos son originados por procesos geológicos y formación de los suelos y la concentración de los metales pesados en el suelo es gobernado por el material parental, clima, topografía y actividades humanas.¹ Están presentes en relativamente bajas concentraciones (mg/ kg) en la corteza de la tierra, suelos y plantas. Muchos de ellos son esenciales para el crecimiento y desarrollo de plantas, animales y seres humanos, aunque también pueden ser tóxicos si se superan ciertos umbrales.²

Estudios realizados por Smith, 1996 indican que la concentración de metales pesados en los suelos está en función del pH, la materia orgánica del suelo, la capacidad de intercambio catiónico y otras propiedades físicas, su movimiento no supera los 40 cm del perfil del suelo y toman mucho tiempo en alcanzar hasta la mitad de su actual concentración.³

Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2006 dice “Los metales pesados han sido ampliamente utilizados en muchas actividades, tales como la agricultura, la minería, la fundición, la galvanoplastia y el refinado del oro”.⁴ Según Alloway *et al.*, 1993 “Se pueden entrar a los suelos agrícolas con el uso de pesticidas, fertilizantes, compost, estiércol, lodos y aguas residuales que contienen trazas de estos metales”.¹

Estudios realizados por Bohn *et al.*, 1985 indican que los metales pesados contribuyen fuertemente a la contaminación ambiental debido a que no son biodegradables, no son termo - degradables, generalmente no percola a las capas inferiores de los suelos y pueden acumularse sutilmente a concentraciones tóxicas para las plantas y animales.¹

Alloway *et al.*, 1993 indica que la duración de la contaminación por metales pesados en los suelos puede ser por cientos o miles de años. El tiempo que le toma al Cd, Cu y Pb alcanzar la mitad de su actual concentración en suelos es de 15 – 1100, 310 – 1500 y de 740 – 5900 años respectivamente, dependiendo del tipo de suelo y de sus parámetros físico – químicos.¹

Según Baird, 1999 los metales tienden a acumularse en la superficie del suelo quedando accesibles al consumo de las raíces de los cultivos. Puga *et al.*, 2006 indica que en el suelo superficial se reducen lentamente mediante la lixiviación, el consumo por las plantas, la erosión y la deflación.⁵

Las actividades económicas que generan impactos por Cd y/o Pb son las siguientes³:

- Actividades industriales:
 - Elaboración de productos alimenticios y bebidas, como por ejemplo en el uso de tierras de cultivo de vegetales encontrando niveles de Pb en terrenos cultivables por encima de 360 mg Pb/Kg.⁵⁵
 - Fabricación de prendas de vestir, adobo y teñido de pieles.
 - Fabricación de muebles, industria manufacturera.
 - Producción de madera y fabricación de productos de madera. En la utilización de barnices para el barnizado de los muebles y productos de madera, así como también en el uso de pinturas.⁵⁶
 - Fabricación de metales comunes. Durante la fusión primaria y secundaria del mineral, así como también en el pulido y refinado de los metales.⁵⁶
 - Fabricación de maquinaria y aparatos eléctricos.
 - Fabricación de vehículos automotores. Generados durante la fabricación de las baterías que usan los mismos.⁵⁶
 - Actividades de edición e impresión y de reproducción de grabaciones.

- Actividades agropecuarias³:
 - Cultivos de cereales y leguminosas: Maíz, sorgo, trigo, cebada, avena, frijol.
 - Cultivo de papa.
 - Cultivo de hortalizas.
 - Floricultura.
 - Ganadería.

Hay evidencias de que el Pb y Cd han sido la causa de efectos negativos sobre la salud humana, de la mortandad en animales, y la perturbación de los ecosistemas naturales y los agro-ecosistemas. En general, los metales pesados pueden ser potencialmente tóxicos para la salud humana.¹⁰

1.1.1 El Cadmio.

El Cd es un metal relativamente escaso, ya que ocupa el puesto 67 del orden de abundancia relativa de los elementos en la naturaleza, y no se considera un elemento esencial, ni para los animales ni para las plantas, puesto que no cumple ningún papel o función biológica en el organismo, y por el contrario se considera altamente tóxico tanto para las plantas como para los animales.³

Es introducido en el suelo por el uso de agroquímicos en la agricultura, el contacto con aguas residuales, el uso de aguas de riego que contengan este elemento o por la deposición sobre la superficie de partículas húmedas y secas que son arrastradas por el aire provenientes de procesos industriales. El Cd se moviliza a través del suelo dependiendo de factores como el pH y el contenido de materia orgánica, a este último se adhiere fuertemente hasta entrar en contacto con la superficie radical de las plantas a través de una difusión de iones.³

La EPA ha fijado un límite de 5 porciones de Cd por mil millones de porciones de agua potable (5 ppb). No permite Cd en pesticidas.

El FDA limita la cantidad de Cd en colorantes a 15 partes por millón (15 ppm). La OSHA limita el aire del lugar de trabajo a 100 μg de Cd por metro cúbico ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) como humos del Cd y 200 el $\mu\text{g Cd}/\text{m}^3$ como polvo de cadmio.¹²

Los límites permisibles para suelos en el medio ambiente según la Universidad Autónoma Metropolitana son los siguientes¹³:

- Uso en riego agrícola:
0.05 mg/L promedio mensual.
0.1 mg/L promedio diario
- Humedales naturales:
0.1 mg/L promedio mensual.
0.2 mg/L promedio diario

1.1.2 El Plomo.

Se encuentra naturalmente en pequeñas cantidades en la corteza terrestre. Los compuestos de Pb se usan como pigmentos en pinturas, en barnices para cerámicas y en materiales de relleno. La cantidad de Pb que se usa en estos productos ha sido reducida para minimizar los efectos nocivos del Pb sobre seres humanos y animales debido a su alta toxicidad. El Pb entra a los suelos por la deposición de partículas arrastradas por el viento, el contacto con aguas residuales industriales, el riego de cultivos con aguas que contengan pequeñas fracciones de este metal, y aguas de escorrentía provenientes de apilamientos minerales. En el suelo el Pb tiene una gran afinidad con las sustancias húmicas y el pH y depende de ellos para fijarse, pero debido a que es poco móvil permanece en los horizontes superiores y no es asimilado en grandes cantidades por las plantas.³

Al ingresar al medio ambiente el Pb ¹²:

- No se degrada, sin embargo, los compuestos de Pb son transformados por la luz solar, el aire y el agua.
- Cuando se libera al aire, puede ser transportado largas distancias antes de sedimentar al suelo.
- Una vez que cae a tierra, generalmente se adhiere a partículas en el suelo.
- El movimiento del Pb desde el suelo a aguas subterráneas dependerá del tipo de compuesto y de las características del suelo.

La EPA requiere que como promedio en un período de 3 meses la cantidad de Pb en el aire no sobrepase 1.5 microgramos por cada metro cúbico de aire (1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). La EPA limita la cantidad de Pb en agua potable a 15 $\mu\text{g}/\text{l}$.¹²

Los límites permisibles para suelos en el medio ambiente según la Universidad Autónoma Metropolitana son los siguientes ¹³:

- Uso en riego agrícola:
5 mg/L promedio mensual.
10 mg/L promedio diario.
- Humedales naturales:
0.2 mg/L promedio mensual.
0.4 mg/L promedio diario.

1.2. Contaminación Provocada por Efluentes Mineros en el Medio Ambiente.

La minería en su conjunto produce toda una serie de contaminantes gaseosos, líquidos y sólidos, que de una forma u otra van a parar al suelo. Esto sucede ya sea por depósito a partir de la atmósfera como partículas sedimentadas o traídas por las aguas de lluvia, por el vertido directo de los productos líquidos de la actividad minera y metalúrgica, o por la infiltración de productos de lixiviación del entorno minero: aguas provenientes

de minas a cielo abierto, escombreras (*mineral dumps*), etc., o por la disposición de elementos mineros sobre el suelo: escombreras, talleres de la mina u otras edificaciones más o menos contaminantes en cada caso.⁶

En definitiva, la minería puede producir sobre el suelo alteraciones más o menos importantes de carácter físico, físico-químico y químico, que en general ocasionan su infertilidad, o en el peor de los casos, mantienen su fertilidad pero permiten el paso de los contaminantes a la cadena alimenticia, a través del agua, o de la incorporación de los contaminantes a los tejidos de animales o vegetales comestibles.⁶

Wong, 2003 dice que una de las anomalías geoquímicas que se generan al momento de la extracción, es el aumento de la cantidad de microelementos en el suelo convirtiéndolos a niveles de macroelementos, los cuales afectan negativamente la biota y calidad del suelo, estos afectan el número, diversidad y actividad de los organismos del suelo inhibiendo la descomposición de la materia orgánica del suelo.⁵

1.3. Contaminación provocada por Residuos Industriales (RI).

Este gran volumen de residuos, junto a la ausencia de instalaciones suficientes para su correcto tratamiento, han llevado a prácticas de alto riesgo y peligrosidad, como son los vertidos de aguas residuales industriales en los cauces de los ríos y en el subsuelo o el almacenaje de RI especiales en vertederos incontrolados.⁷

1.4. Efectos de la Contaminación.

1.4.1. Suelos.

Según los estudios realizados por Puga *et al.*, 2006 en donde se analizaron cuatro elementos; As, Pb, Zn y Cd en sitios cercanos a relaves mineros: “Los cuatro elementos estudiados, presentaron una mayor acumulación en los 2 sitios cercanos a la

presa de jales, esto es los primeros 600m., en estos dos sitios la concentración de As, Pb y Zn, fueron mayores en las profundidades de 40-60 y 60-80 cm que en la superficie. El Cd fue el único metal que no presentó esta característica y que en estos sitios presentó mayor concentración en la superficie”.⁵

1.4.2. Aguas.

El agua potable no solo se contamina de forma natural por microorganismos, sino también por diferentes sustancias o por otras vías que involucran actividades humanas.⁸ Incluyen sales, residuos de hidrocarburos derivados del petróleo, solventes provenientes de la industria y la agricultura, así como lixiviados de depósitos de basura, letrinas y pozos negros”.⁸

Las actividades agropecuarias, en zonas de recarga acuífera, pueden contaminar aguas superficiales y subterráneas, dependiendo de diversos factores como el origen y la estructura del acuífero, el tipo, la estructura y la permeabilidad del suelo.⁸

Estudios realizados por el Ministerio de Medio Ambiente de Ecuador: “Esta contaminación puede ocurrir durante la extracción minera, el refinamiento de productos mineros o por la liberación al ambiente de efluentes industriales; así como, el manejo inadecuado de desechos metálicos contaminando otros compartimientos ambientales como agua superficial, agua subterránea, biota, sedimentos”.⁹

Según A. Navarro *et al.*, 1996 Estos procesos de contaminación se producen mediante cuatro mecanismos fundamentales⁷:

- Vertido incontrolado accidental o voluntario de Residuos Industriales (RI) sólidos o líquidos, ya sea sobre el terreno, en el subsuelo o en los cauces de los ríos.

- Inyección de RI líquidos a través de pozos en desuso o pérdidas de las redes de alcantarillado de polígonos industriales.
- Relleno de antiguas extracciones de áridos con RI.
- Fugas de tanques y depósitos de almacenamiento y tuberías de conducción de hidrocarburos y otros productos químicos.

La contaminación también se reporta a grandes distancias, como en el caso donde sustancias específicas aplicadas en los trópicos han sido detectadas en las regiones árticas, producto de corrientes de convección que circulan alrededor del planeta.⁸

Estudios realizados por Shi *et al.*, 1991 indican que las lagunas con plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales, se basan en principios ecológicos, en donde los efluentes son tratados eficientemente mediante relaciones mutuas y coordinadas de flujo de energía y nutrientes, entre las plantas acuáticas y los microorganismos degradadores.⁴⁷

1.4.3. Plantas.

Varios autores han demostrado el riesgo de contaminación por metales pesados en el agua, suelos y sedimentos y el riesgo potencial para la salud humana debido a la acumulación de metales pesados en las plantas.¹

En las plantas los metales pesados son altamente tóxicos y la absorción por parte de estas mínimas concentraciones de estos elementos genera fitotoxicidad la cual se manifiesta afectando el crecimiento y la formación de raíces laterales y secundarias.³

La DREM (Dirección Regional de Energía y Minas), INRENA (Instituto Nacional de Recursos Naturales) y MINSA (ministerio de Salud) de Puno (2001), indican que la vegetación natural expuesta a metales pesados puede incluir toxicidad, captación y

bioacumulación, ya que esta vegetación sirve de alimento para los animales pudiendo impactar en los procesos metabólicos, inducir cambios fisiológicos e incrementar la susceptibilidad a las enfermedades. Estos pueden ser biológicamente magnificados en la cadena alimenticia ya que el hombre y animales mayores, se contaminarán ingiriendo animales afectados.¹¹

1.5. Estudios de Plomo y Cadmio.

1.5.1. En suelos.

Según estudios realizados por Puga *et al.*, 2006 sobre la contaminación de los relaves mineros en el suelo por Pb, Cd, As y Zn a diferentes distancias y niveles de profundidad se determinó que “La concentración de As, Pb y Zn fueron mayores en las profundidades de 40-60 y 60-80 cm que en la superficie. El Cd fue el único metal que no presentó esta característica y que en estos sitios presento mayor concentración en la superficie”.⁵

La retención del plomo en las raíces, se fundamenta en la unión de Pb^{2+} hacia iones con sitios intercambiables sobre la pared celular formando depósitos en la misma, por consiguiente ocurre una precipitación extracelular a la forma de carbonato de plomo. Autores como Jarvis *et al.*, 2002 mencionan que el plomo se bioacumula mayormente en las raíces de las plantas más que en otra parte, debido a que el ion Pb^{2+} se une fuertemente a los grupos carboxilo del ácido galacturónico y al propio galacturónico que está presente en las paredes celulares y que restringe su transporte vía apoplasto.⁴⁹

Estudios realizados en plantas de álamo indican que la concentración de Pb en las raíces, tallos y hojas aumenta con la concentración de $(NO_3)_2$ Pb en el medio hidropónico siendo esta mayor en las raíces que en los tallos o las hojas. Al aumentar la concentración de Pb en el medio hidropónico, la biomasa total se vio afectada negativamente con concentraciones mayores de 0.75 mM.⁵⁰

1.5.2. En aguas.

En el Río Rímac, Lima – Perú la contaminación por Pb ha afectado gran parte de la cuenca alta y media y en algunas zonas puntuales de la cuenca baja. En todos los años la contaminación por Pb ha excedido el LMP en la cuenca alta del río Rímac.¹

En la cuenca del río Rímac, la concentración media de Pb en el año 2004 fue de 0.09 mg/L para SEDAPAL y 0.06 mg/L para DIGESA. 80% de los puntos de monitoreo evaluados sobrepasaron el LMP. La contaminación por Pb ha afectado gran parte de la cuenca media y cuenca alta y en zonas puntuales de la cuenca baja según SEDAPAL. Los niveles de contaminación por Pb más alto se reportaron en el punto de monitoreo Río Blanco con 0.43 mg/L (8 veces el LMP).¹

Estudios realizados por Lora, 2007 y Bonomelli *et al.*, 2003 han demostrado que el Cd está asociado a minerales de Zn y P, a manera de impureza; por lo que los fertilizantes cuya constitución química está basada en estos elementos, pueden contener este metal, que se llega a convertir en contaminantes y acumularse, en los organismos vivos que ingieran material vegetal y debido a su toxicidad se encuentran sujetos a una de las legislaciones más severas en términos ambientales, porque en la vida acuática puede incorporarse a los peces, a la vez a la cadena alimenticia y afectar a la salud humana cuyos efectos pueden ser agudos y crónicos.⁴⁴

1.6. Fitorremediación.

Singh *et al.*, 2003; Reichenauer *et al.*, 2008 indican que la fitorremediación representa una alternativa sustentable y de bajo costo para la rehabilitación de ambientes afectados por contaminantes naturales y antropogénicos.¹⁴

Actualmente existen estudios tendientes a resolver la contaminación originada por metales pesados en suelos, mediante estrategias basadas en el uso de plantas que tienen

la propiedad de acumular metales pesados; proceso denominado “fitorremediación” que consiste en la remoción, transferencia, estabilización y/o degradación y neutralización de compuestos orgánicos, inorgánicos y radioactivos que resultan tóxicos en suelos y agua.¹⁵

Ernst, 2000 dice que concepto de usar plantas para limpiar suelos contaminados no es nuevo, desde hace 300 años las plantas fueron propuestas para el uso en el tratamiento de aguas residuales. En Rusia en los años sesentas se realizaron investigaciones utilizando plantas para recuperar suelos contaminados con radionucleótidos. Existen reportes sobre el empleo de plantas acuáticas en aguas contaminadas con Pb, Cu, Cd, Fe y Hg. La remediación de la acumulación de metales pesados en suelos utilizando plantas es también ampliamente reconocida.¹⁶

Merkel *et al.*, 2004 indica que la fitorremediación es el uso de plantas para recuperar suelos contaminados, es una tecnología *in situ* no destructiva y de bajo costo y está basada en la estimulación de microorganismos degradadores. Consiste en el uso de plantas, sus microorganismos o enzimas asociadas, así como de la aplicación de técnicas agronómicas para degradar, retener o reducir a niveles inofensivos los contaminantes ambientales a través de procesos que logran recuperar la matriz o estabilizar al contaminante.¹⁶

Frick *et al.*, 1999 comenta que dentro de las técnicas de restauración de suelos afectados por la contaminación, la fitorremediación ha adquirido auge por ser un procedimiento pasivo, estéticamente agradable, útil para remediar simultáneamente una gran variedad de contaminantes.¹⁶

En estudios realizados por Singh *et al.*, 2003 han demostrado que la fitorremediación es una solución prometedora para la limpieza de sitios contaminados por una variedad de metales, aunque también tiene una serie de limitaciones, además, McGrath *et al.*, 2001 indica que es un proceso de descontaminación que involucra el empleo de plantas

que pueden remover, transferir, estabilizar, descomponer y/o degradar contaminantes de suelo, sedimentos y agua, como solventes, plaguicidas, hidrocarburos poliaromáticos, metales pesados, explosivos, elementos radiactivos, fertilizantes, para hacerlos más biodisponibles para la planta.¹⁶

Gunse *et al.*, 1997 indican que algunos metales pueden ocasionar la reducción en la extensibilidad y la elasticidad de las plantas. García, 2006 dice que los cultivos expuestos a metales pesados presentan déficit hídrico, es decir problemas en la absorción del agua que a largo plazo inhiben el desarrollo normal y disminuyen la calidad de los frutos cosechados.³

Estudios realizados por Chen *et al.*, 2001 indican que todas las plantas poseen un potencial para absorber una amplia variedad de metales del suelo pero la mayor parte de las plantas tienden solamente a absorber los que son esenciales para su supervivencia y desarrollo. Existe una notable excepción de esta regla de un pequeño grupo de plantas que pueden tolerar, absorber y translocar altos niveles de ciertos metales, estas plantas reciben el nombre de hiperacumuladoras.¹⁷

Se han identificado una amplia diversidad de especies que se emplean para este fin. Algunas de ellas, debido a su gran capacidad para acumular metales pesados, reciben el nombre de hiperacumuladoras. Por definición, estas plantas deben acumular al menos 100 µg/g (0.01 % peso seco) de Cd y As; 1000 µg/g (0.1 % peso seco) de Co, Cu, Cr, Ni y Pb; y 10 000 µg/g (1.0 % peso seco) de Mn.¹⁴

Según Robinson *et al.*, 2003, si una planta contiene más de 0.1% de Ni, Co, Cu, Cr y Pb o 1% del Zn en sus hojas sobre una base del peso seco, ésta puede ser llamada una “hiperacumuladora”, independientemente de la concentración del metal en el suelo.¹⁶

Según Xiong, 1997 y Singh *et al.*, 2003 los pastos son el género más adecuado para la fitorremediación de formas orgánicas e inorgánicas de metales, por su hábitat de crecimiento y adaptabilidad a una variedad de condiciones edáficas y climáticas.¹⁶

Tabla N°01: Ventajas y Desventajas de la fitorremediación

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ol style="list-style-type: none"> 1. Se puede realizar <i>in situ</i> y <i>ex situ</i>. 2. Se realiza sin necesidad de transportar el sustrato contaminado, con lo que se disminuye la diseminación de contaminantes a través del aire o del agua. 3. Es una tecnología sustentable. 4. Es eficiente tanto para contaminantes orgánicos como inorgánicos. 5. Es de bajo costo. 6. No requiere personal especializado para su manejo. 7. No requiere consumo de energía. 8. Solo requiere de prácticas agronómicas convencionales. 9. Es poco perjudicial para el ambiente. 10. Actúa positivamente sobre el suelo, mejorando sus propiedades físicas y químicas, debido a la formación de una cubierta vegetal. 11. Tiene una alta probabilidad de ser aceptada por el público, ya que es estéticamente agradable. 12. Evita la excavación y el tráfico pesado. 13. Se puede emplear en agua, suelo, aire y sedimentos. 14. Permite el reciclado de recursos (agua, biomasa, metales). 	<ol style="list-style-type: none"> 1. En especies como los árboles o arbustos, la fitorremediación es un proceso relativamente lento. 2. Se restringe a sitios de contaminación superficial dentro de la rizósfera de la planta. 3. El crecimiento de las plantas está limitado por concentraciones tóxicas de contaminantes, por lo tanto, es aplicable a ambientes con concentraciones bajas de contaminantes. 4. En el caso de la fitovolatilización, los contaminantes acumulados en las hojas pueden ser liberados nuevamente al ambiente. 5. Los contaminantes acumulados en maderas pueden liberarse por procesos de combustión. 6. No todas las plantas son tolerantes o acumuladores. 7. La solubilidad de algunos contaminantes puede incrementarse, resultando en un mayor daño ambiental o mitigación de contaminantes. 8. Se requieren áreas relativamente grandes. 9. En sistemas acuáticos se puede favorecer la diseminación de plagas, tales como los mosquitos.

Tropical and Subtropical Agroecosystems 14(2011).¹⁴

Según un estudio realizado en lodos de depuradora de aguas residuales la absorción de metales por la planta aumenta al incrementarse la concentración total de metales en

suelos, es decir al aumentar la dosis de lodos aplicada, hasta que alcanza un valor máximo o umbral a partir del cual la planta no responde a mayores aplicaciones de lodos. Este umbral es diferente para cada especie vegetal en función de sus estrategias para tolerar elevadas concentraciones de metales en suelos”.¹⁸

La fitorremediación puede aplicarse eficientemente para tratar suelos contaminados con compuestos orgánicos como benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX); solventes clorados; HAPs; desechos de nitrotolueno; agroquímicos clorados y organofosforados; además de compuestos inorgánicos como Cd, Cr(VI), Co, Cu, Pb, Ni, Se y Zn. Se ha demostrado también su eficiencia en la remoción de metales radioactivos y tóxicos de suelos y aguas.⁴⁵

1.7. Características de las Plantas en Estudio.

1.7.1. TOTORA (*Scirpus californicus*).

a. Generalidades.

Wetzel, 1981 explica que el término macrófita acuática, se refiere a las formas macroscópicas de vegetación acuática y comprende las macro algas, las escasas especies de pteridofitos y las verdaderas angiospermas.⁴³

Una de las macrófitas más conocidas y difundidas en nuestro medio es la Totora (*Scirpus californicus*). Esta especie fue llevada del Lago Titicaca (Puno-Perú) a la Laguna Alalay (Cochabamba-Bolivia), donde forma parte de la flora presente en la laguna y también se encuentra en abundancia en las zonas de inundación de la planta de tratamiento de Alba Rancho. Esta macrófita, forma parte de la amplia gama de plantas fitodepuradoras empleadas en los sistemas no convencionales de depuración de aguas residuales en ese país.¹⁹

Cano, 2004 indica que se da la asimilación directa de nutrientes (en especial Nitrógeno y Fósforo) y metales, que son retirados del medio e incorporados al tejido vegetal. Las helófitas más usadas en depuración son *Typha*, *Scirpus*, *Phragmites* y *Carex*.¹⁹

b. Nombre Científico.

Scirpus californicus tator.

c. Familia.

Cyperaceae.

d. Descripción Botánica

Inga, 2004 explica que la totora tiene rizomas, que son tallos subterráneos que crecen paralelamente a la superficie del suelo. Éstos presentan a un lado raíces adventicias y al otro lado ramas hacia la superficie con hojas y yemas.¹⁹

Acumulan reservas, con lo que aumentan su volumen, y en épocas favorables las yemas aprovechan esas reservas para germinar.¹⁹

Los tallos varían de 1 m a 4 m, erectos, remotos o próximos entre sí; lisos, trígonos o subteretes, verde-amarillentos cuando secos. Presentan vainas foliares pardo oscuro, sin láminas. Tienen aerénquimas, que son tejidos sin color con grandes espacios intercelulares llenos de aire, que facilitan la flotación y la llegada de aire a los órganos sumergidos.¹⁹

Los tallos se clasifican en dos partes:

- Tallo aéreo.

Es la parte del tallo que sobresale del agua, es de color verde intenso por la clorofila que contiene. En su interior presenta tejido parenquimatoso no clorofílico (tejidos simples no diferenciados) La forma de su sección va de triangular a circular, dependiendo de la edad de la planta, situación climática, nutrientes del sustrato de fondo, etc.²⁰

La parte fuera del agua presenta un tejido parenquimático llamado “aerenquima” que contiene aire, el cual favorece la circulación del aire en el tejido esponjoso, así como le permite flotar en el agua.²⁰

El tejido parenquimático, desarrolla funciones de almacenamiento, respiración y en algunos casos realiza la fotosíntesis.²⁰

- Tallo sumergido.

Es la parte que comienza en el rizoma maduro, con una parte blanquecina (por falta de clorofila) denominada “chullo” que almacena disacáridos y se usa como alimento humano, y alcanza hasta el pelo de agua (nivel).²⁰

En su conjunto los tallos pueden crecer de 30cm. a 100 cm. ó más, de altura cada 4 meses, aproximadamente, lo que está en función del sustrato, hábitat y medio ambiente. Llegan a alcanzar alturas de 2 a 6 metros.

En las plantas vasculares, los tejidos de conducción están asociados a células parenquimáticas y tejidos de sostén. Se agrupan en pequeños haces conductores, que son de dos clases:

- Xilema.

El xilema está formado por vasos leñosos o tráqueas.

Incluyen también las denominadas traqueidas, formadas por células alargadas con orificios llamados puntuaciones, que las comunican entre sí.¹⁹

- Floema.

El floema está constituido por tubos o células cribosas.

Entre las células existen tabiques con agujeros o cribas que se obturan a bajas temperaturas y dificultan la conducción de sustancias orgánicas.¹⁹

e. Inflorescencia.

La totora tiene la inflorescencia tipo Umbela, llamada de forma vernacular: “Pancara” o “Panq´ara”, compuesta, caracterizada porque las primeras ramificaciones dan lugar a su vez a otras umbelas pequeñas y la umbelilla dispuesta en sus ejes terminales tiene un número variable de flores, en el que cada eje terminal está cubierto de una bráctea escamosa de color café oscuro de 3 a 5 mm., de longitud.²⁰

La flor está rodeada por un conjunto de hojas pequeñas transformadas que rodean a los verticilos fértiles de las flores, que carecen de sépalos y pétalos.²⁰

En sus verticilos externos está representada por 4 escamas que hacen las veces de un perigono haploide en algunas dicotiledóneas y que en este caso serían como las glumas de las gramíneas, toman de una disposición parecida al género *Triticum*. El perigonio es tetrámero actinomorfo; el androceo está dispuesto en dos verticilos, las escamas son semejantes a las glumillas de las gramíneas y finalmente se observa el último verticilo floral.²⁰

Una vez madura la inflorescencia, forma la semilla que por acción del viento caen al agua, dando lugar posteriormente a una nueva planta de totora como acción de una regeneración natural de la totora, siempre y cuando las condiciones naturales y antrópicas lo permitan.²⁰

f. Hábitat

Se encuentra restringida a áreas inundadas casi permanentemente, lagunas costeras y grandes lagos de agua dulce.⁵¹

g. Descripción de uso y palatabilidad

Portillo *et al.*, 1993 dicen que la totora sirve como alimento para el ganado, considerándose un recurso natural de importancia para el Altiplano porque constituye la base de la producción de carne y leche.

Estudios realizados por Fernández *et al.*, 1966 indican que el contenido de nutrientes digestibles totales (NDT) de totora en floración es de 63.8%, mientras que para la totora madura es de 61.1%. Estos resultados ubican a la totora como un forraje de mediano nivel energético, puesto que su contenido de NDT está en el rango de 60 a 65%. Comparando los niveles de NDT de totora del presente estudio con datos anteriores de 61% para ovinos y 73% para alpacas, se observa que el vacuno digiere mejor la totora en floración que el ovino.⁵²

h. Valor Nutricional

- Proteína total: 6.5 % de Materia Seca (MS).
- Fibra cruda: 39.4 % de MS.
- Extracto etéreo: 1.8 % de MS.⁵²

i. Beneficios que proporciona la totora.

- Purifica las aguas contaminadas.²⁰
- Sirve para proteger el suelo de las orillas de la erosión que causan las olas que se llevan la tierra que sirve para sembrar.²⁰
- La totora sirve de alojamiento de muchas especies de animales e insectos y otras plantas que juntas crean un ecosistema útil para el hombre, el medio ambiente y los animales.²⁰

1.7.2. ICHU (*Stipa ichu*).

a. Generalidades.

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial utilizando la planta *Stipa ichu* fueron eficientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas, y permitieron obtener efluentes aptos para ser vertidos en cualquier punto receptor.⁴²

La fácil adaptabilidad y rápido crecimiento de esta planta permite transformar la mayor cantidad de contaminantes para su desarrollo, lo que permite su descontaminación.⁴²

b. Nombre científico.

Stipa ichu (Ruiz et Pavon) Kunth.

c. Familia.

Gramíneas

d. Descripción botánica.

Planta perenne; crece en manojos densos, de 20 – 60 cm de altura; hojas de 10 – 25 cm de largo, enrolladas con volutas rígidas; inflorescencia en panícula densa espiciforme de color algo plateado; espiguillas con glumas más largas que la lema, membranáceas; lema cilíndrico pubescente, los pelos más largos, como un mechón, en el ápice, a manera de un papus.²²

e. Hábitat.

Suelos descubiertos algo degradados, pajonales de puna.²²

f. Descripción de uso y palatabilidad.

Mayormente consumido por llamas y vacunos, sólo en estado tierno es consumido por alpacas durante el pastoreo de verano (puna seca).²²

g. Valor nutricional.

- Proteína cruda
Elongación 5.1 %
- Fibra cruda
Elongación 35.4 %
- Proteína digestible (ovinos). 2.25 % (Elongación)²²

h. Beneficios que proporciona el Ichu

- Las fibras de Ichu tienen propiedades de aislamiento térmico que pueden utilizarse para aumentar el aislamiento térmico de las viviendas en las regiones andinas.⁵³
- El Ichu se usa para la mezcla del barro en la elaboración de adobes.²²

1.7.3. Resistencia y adaptabilidad a sistemas hidropónicos y descontaminación de metales pesados en Totora e Ichu.

La totora se desarrolla muy bien en cultivos hidropónicos, es decir, en medios acuosos sin tierra u otro sólido. Puede sobrevivir también varias semanas en agua destilada. En todos los ensayos había absorción de metales por las plantas de totora. La absorción de los metales es más lenta en soluciones nutritivas. Manganeso y Zinc son eliminados con menor rapidez que cobre y plomo.²¹

CAPÍTULO II: MATERIALES Y METODOS.

2.1 MATERIALES.

2.1.1 Materiales de Vidrio.

- Pipetas graduadas de 0.5, 1 y 2 ml.
- Probeta de 50 y 100 ml.
- Beakers de 100,500 y 1000 ml.

2.1.2 Material Biológico.

- Plantas de *Scirpus californicus* (Totorá)
- Plantas de *Stipa ichu* (Ichu)

2.1.3 Equipos.

- Balanza analítica.
- Espectrofotómetro de absorción atómica.
- Cinta medidora de pH.
- Bomba de aire.

2.1.4 Materiales Químicos.

- Nitrato de Plomo ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$)
- Cloruro de Cadmio (CdCl_2)
- Sales hidropónicas UNALM.

2.1.5 Otros.

- Invernadero.
- Bandejas de plástico (20), de 25 cm de profundidad y un volumen de 9 lts.
- Mangueras de plástico (25 mts)
- Algodón.
- Codos y cruces de plástico para mangueras.

2.2 METODOLOGÍA.

2.2.1 Recolección de plantas Altoandinas *Stipa ichu* (Ichu) y *Scirpus californicus* (Totora).

a. Recolección de *Stipa Ichu* (Ichu).

Lugar de recolección: La Oroya

Altura: 3000 msnm

Procedimiento de recolección:

- Para la extracción de las plantas del suelo, se realizaron excavaciones con un radio de 10 cm de distancia desde el tallo principal con el objetivo de proteger las raíces.
- Una vez colectadas las plantas fueron agrupadas en dos y colocadas en bandejas de plástico.
- Las bandejas fueron llenadas con tierra de los puntos de extracción para cubrir las raíces y protegerlas de la exposición a la luz solar.
- Se realizó un archivo fotográfico del proceso de recolección de plantas de Ichu (ANEXO N° 1)

Condiciones Generales:

- Se tomaron las muestras de las plantas altoandinas de su hábitat natural.
- Se colectaron 40 muestras de cada especie seleccionadas del punto de muestreo dependiendo de las condiciones del campo.
- Se seleccionaron plantas de mediana edad y tamaño con buen crecimiento radicular.
- El traslado de las muestras se realizó teniendo cuidado de no exponer las raíces de las plantas a la luz solar.

b. Recolección de *Scirpus californicus* (Totora).

Lugar de recolección: Canal de regadío, Pantanos de Villa, Lima. Perú.

Altura: 100 msnm

Procedimiento de recolección:

- La extracción de las plantas se realizó manualmente, debido a la fragilidad de las raíces, se utilizó una lampa de mano para facilitar la extracción teniendo cuidado de no dañar las raíces.
- La reproducción de las plantas es asexual, a partir de las raíces crecen nuevas plantas, por ésta razón se tuvo cuidado en seleccionar las raíces guías de las plantas extraídas.
- Una vez colectadas las plantas fueron agrupadas en dos y colocadas en bandejas de plástico protegidas con bolsas de polietileno negras de tamaño grande agregándoles una pequeña cantidad de agua tomada de los puntos de extracción seleccionados.
- Se realizó un archivo fotográfico del proceso de recolección de plantas de Totora (ANEXO N° 2)

2.2.2 Cultivo en sistema hidropónico

a. **Instalación y acondicionamiento de un invernadero para el desarrollo del sistema hidropónico.**

- **Instalación de la estructura central del invernadero.**

De acuerdo a la metodología del Centro de Investigación de Hidroponía y Nutrición Mineral de la Universidad Agraria La Molina³⁰, el diseño estructural de un invernadero debe brindar protección contra daño de viento, lluvia, calor y frío. Las estructuras de invernaderos normalmente están cerradas para controlar la temperatura, y abiertas sólo para dar ventilación y para prevenir que entren insectos.

Partiendo de la base de un toldo de estructura metálica para playa, se pudo acondicionar un invernadero de un área aproximada de 09 m².

Se armó el toldo asegurando las bases con bolsas de polietileno llenadas con arena para brindarle estabilidad y evitar el movimiento provocado por acción del viento de manera que se brindara protección a los cultivos de factores ambientales externos.

- **Enmallado.**

Usando hilo de nylon y malla Raschel de tipo Raschelnet 65% de sombra se realizó el enmallado de las paredes del invernadero, dejando un espacio libre para el tránsito de materiales y limpieza del mismo.

El enmallado se realizó asegurando cada una de las bases verticales con hilo de nylon a la malla atándolos fuertemente, de igual manera se aseguraron las bases horizontales dándole mayor estabilidad al invernadero.

- **Colocación del piso.**

Una vez enmallado el invernadero se procedió a realizar el tapizado del piso sobre el cual se levantó la estructura, con la finalidad de generar un espacio limpio y reducir la contaminación ambiental.

El tapizado se realizó utilizando plástico grueso para piso (manga plast) que fue asegurado utilizando hilo de nylon a la base de la malla de las paredes del invernadero.

- **Instalación del alumbrado y el sistema eléctrico.**

Mediante el uso de un foco portátil de 100 watts con conexión directa a la corriente eléctrica y contando con una toma de corriente cercana se pudo colocar iluminación en la estructura del techo en la parte central del invernadero brindando luz artificial al área.

En el ANEXO N° 3 se aprecian registros fotográficos del proceso de armado e instalación del invernadero.

- **b. Preparación del medio de cultivo hidropónico.**

Se utilizó la solución hidropónica del Centro de Investigación de Hidroponía y Nutrición Mineral de la Universidad Nacional Agraria La Molina, la cual lleva la siguiente fórmula:

Tabla N°02: Fórmula Solución Hidropónica Concentrada UNALM.

Solución Concentrada A (para 5.0 lt de agua, Volumen final)	Pesos
Nitrato de Potasio	550.0 g
Nitrato de Amonio	350.0 g
Superfosfato Triple	180.0 g

Solución Concentrada B (para 2.0 lt de agua, Volumen final)	Pesos
Sulfato de Magnesio	220.0 g
Quelato de Hierro 6% Fe	17.0 g
Solución de Micronutrientes	400 ml
Solución Micronutrientes (para 1.0 lt de Agua Destilada o Hervida)	Pesos
Sulfato de Manganeso	5.0 g
Ácido Bórico	3.0 g
Sulfato de Zinc	1.7 g
Sulfato de Cobre	1.0 g
Molibdato de Amonio	0.2 g

A continuación se detalla el modo de Preparación.

Solución Concentrada A.

- Dentro del envase de la Presentación Juego en Sales hay dos bolsas; una contiene los fertilizantes para preparar la Solución Concentrada A: nitrato de potasio, nitrato de amonio y superfosfato triple.
- Echar 3 litros de agua en un recipiente graduado, disolver el nitrato de potasio. Agitar vigorosamente hasta observar que el fertilizante se disuelva totalmente, Luego agregar el nitrato de amonio; agitar y disolver.
- Por otro lado, remojar el superfosfato triple en aproximadamente 250 ml de agua. Agitar continuamente.
- Verter el sobrenadante sobre la solución de nitrato de potasio y nitrato de amonio.

- Repetir esta operación varias veces, agregando poca agua (apenas 50 ml), hasta observar un color claro (transparente). En el fondo queda la arena. Eliminar el residuo final (arena).
- Una vez que los tres fertilizantes se encuentren juntos en el recipiente, agregar agua hasta completar un volumen final de CINCO (5) litros.
- Almacenar la solución concentrada A en un recipiente con tapa.

Solución Concentrada B.

- Dentro del envase de la Presentación Juego en Sales la segunda bolsa contiene los fertilizantes para preparar la Solución Concentrada B: sulfato de magnesio, quelato de hierro y micronutrientes.
- En un recipiente graduado, disolver el sulfato de magnesio en un litro de agua. Agitar vigorosamente hasta que se disuelva totalmente.
- En otro recipiente, verter la mezcla de micronutrientes sobre agua destilada o hervida. Agitar hasta disolver totalmente. Echar esta solución sobre la solución de sulfato de magnesio.
- Echar el quelato de hierro sobre la solución que contiene sulfato de magnesio y micronutrientes.
- Agitar continuamente hasta disolverlo totalmente.
- Finalmente, agregar agua hasta completar un volumen final de dos (2) litros.
- Almacenar la solución concentrada B. Para mayor duración, guardar en frasco oscuro y en un lugar fresco.

Preparación de la Solución Nutritiva.

- Agitar previamente las soluciones concentradas A y B.

- Para preparar un litro de solución nutritiva, añadir 5 ml de la solución concentrada A y 2 ml de la solución concentrada B en un litro de agua. Si desea preparar 20, 50, 100 o más litros de solución nutritiva, aplicar la misma relación.

Concentración de la Solución Nutritiva.

La solución nutritiva preparada con solución hidropónica La Molina tiene la siguiente concentración:

Tabla N°03: Fórmula Solución Hidropónica Nutritiva UNALM

Elemento	Símbolo	Peso (ppm)	Elemento	Símbolo	Peso (ppm)
Potasio	K	210	Hierro	Fe	1
Nitrógeno	N	190	Manganeso	Mn	0.5
Calcio	Ca*	150	Boro	B*	0.5
Asufre	S*	70	Zinc	Zn	0.15
Magnesio	Mg*	45	Cobre	Cu	0.1
Fósforo	P	35	Molibdeno	Mo	0.05

1 ppm (una parte por millón) = 1 mg/litro

*incluye las cantidades que aporta el agua

No existe una solución nutritiva óptima para todos los cultivos, porque no todos tienen las mismas exigencias nutricionales, principalmente en nitrógeno, fósforo y potasio. Existe un gran número de soluciones nutritivas para distintos cultivos, y muchas satisfacen los requerimientos de un buen número de ellos.

La concentración de la solución nutritiva variará, según el agua que se utilice para prepararla. Por otro lado, la fórmula puede ser ajustada a la concentración que uno

deseo aplicar conociendo previamente el análisis de agua. También la fórmula puede ser ajustada de acuerdo a los fertilizantes que se puedan conseguir en otros países.

Para el cultivo de Totora se utilizó la concentración regular indicada en el modo de preparación.

Para el cultivo de Ichu se utilizó una concentración del 25% respecto a la concentración indicada en el modo de preparación, debido a las características pobres en nutrientes de suelos por encima de los 3000 msnm.

Según la información recopilada en el Centro de Investigación de Hidroponía y Nutrición Mineral de la Universidad Nacional Agraria La Molina³¹, en la información detallada respecto a la Solución Hidropónica La Molina, en el punto referido a cómo utilizar la solución nutritiva, nos dice que para forraje verde hidropónico se usa la cuarta parte de la dosis. Por ser el Ichu una planta de forraje altoandina dicha concentración se adapta a la especie.

Archivo Fotográfico de Preparación de solución de Nutrientes (ANEXO N° 4)

c. Desarrollo del Sistema Hidropónico.

➤ Distribución de bandejas.

Las bandejas con los diferentes tratamientos se agruparon por cada especie de planta y fueron distribuidas en orden de menor a mayor concentración del metal pesado en análisis.

Tomando en cuenta la distancia de la bomba de aire hacia las bandejas se realizó una distribución de tipo cuadrada, posicionando 03 bandejas de largo por 03 de ancho y colocando la bandeja sin tratamiento (Blanco) en la parte inferior de cada grupo de plantas.

Las bandejas se forraron con cartulina negra para evitar el ingreso de luz y acondicionar las raíces de las plantas.

El forrado de las bandejas brindó oscuridad a las raíces de las plantas evitando el ingreso de la luz, en estudios realizados por Guzmán, 2004 en la técnica de la Película Nutritiva (NFT) indica que las raíces deben estar en un conducto cerrado y oscuro para evitar la entrada de luz, el mencionado estudio confirma la necesidad de brindar oscuridad a las raíces de las plantas.

En el ANEXO N° 7 se detalla el orden de las bandejas y se esquematiza el diseño descrito anteriormente.

➤ **Instalación del sistema de aireación.**

Para el sistema de aireación se requirió de una bomba de aire sin consumo de aceite, para evitar contaminación sobre el medio de cultivo.

Las características técnicas del equipo fueron: 0.020 MPa de presión de aire y un flujo de salida de aire de 0.038 m³/min. La bomba de aire contaba con un dispensador con 04 salidas las cuales fueron utilizadas en su totalidad.

Para la distribución del aire en cada bandeja se utilizaron mangueras de plástico de 10 mm de diámetro aproximadamente y se diseñaron codos con plástico grueso para la unión de las mangueras.

Según estudios realizados por la Universidad Politécnica de Cartagena³³, el sistema radicular requiere oxígeno para la respiración aeróbica, un proceso esencial que libera la energía requerida para el crecimiento radicular lo cual fundamenta la necesidad de instalar un sistema de suministro de oxígeno, de la misma forma el Instituto nacional de investigación agropecuaria de Uruguay³⁴, indica que la presencia de oxígeno en la solución nutritiva es estrictamente necesaria para el desarrollo de la planta y el crecimiento de las raíces.

El diseño y distribución del sistema de aireación se detalla en el esquema del ANEXO N° 7.

➤ **Tratamiento del Sistema Hidropónico con adición de metales pesados.**

Se llevaron a cabo 03 tratamientos con los metales pesados y se estudiaron 03 concentraciones diferentes de los mismos en cada especie de planta analizada.

A continuación se describe cada tratamiento:

- Tratamiento N°01: Adición de Pb en forma de sal soluble en agua en 03 concentraciones diferentes de 20, 50 y 80 ppm.
- Tratamiento N°02: Adición de Cd en forma de sal soluble en agua en 03 concentraciones diferentes de 20, 50 y 80 ppm.
- Tratamiento N°03: Adición de Pb y Cd en forma de sales solubles en agua en 03 concentraciones diferentes de 20, 50 y 80 ppm.
- Para cada concentración del metal se utilizó una bandeja conteniendo 03 plantas de la misma especie.
- El orden en el que se colocaron las bandejas para el desarrollo del proyecto se detalla en el esquema del ANEXO N° 7.

De acuerdo a investigaciones realizadas en la Universidad de Medellín, se realizaron estudios en *Brassica nigra* en donde se utilizaron concentraciones de Cd de 0.02 g/lit (20 ppm), concentración que fue tomada como mínima en la presente investigación, se tiene información además de que existen suelos contaminados con Cd, de los cuales el 80% de los alimentos producidos (cereales, verduras y papa) ocasionan una ingesta de 0.008 a 0.025 g Cd /Kg peso corporal lo cual sustenta el hecho de trabajar con concentraciones mayores para poder determinar el grado del daño provocado en las plantas.³⁸

Lara, 1999 nos dice que la adición de los metales pesados al medio de cultivo hidropónico no generó mayores cambios en la solución de manera que el ensayo se pudo realizar con normalidad, otros estudios indican que las plantas no tienen problemas en adaptarse a sistemas hídricos en presencia de metales pesados, estudios realizados en la Universidad Nacional del Centro del Perú indican que una de las macrófitas más conocidas y difundidas en nuestro medio es *Scirpus californicus*. Esta macrófita forma parte de la amplia gama de plantas fitodepuradoras empleadas en los sistemas no convencionales de depuración de aguas residuales. La planta *Scirpus californicus* (totora) es considerada como una alternativa para la depuración de soluciones de Pb mediante un prototipo de humedal construido de flujo superficial.⁴⁶

➤ **Registro fotográfico de raíces, hojas y tallos.**

- Se llevó a cabo un registro fotográfico de las plantas, registrando dos partes de cada planta, raíces por separado, hojas y tallos juntas.
- El registro fotográfico se realizó una vez por semana.

De acuerdo a estudios realizados en la Universidad de Nueva Granada, durante el transcurso de un experimento se realizó un registro fotográfico semanal y se determinaron los síntomas de deficiencias de las plantas de orégano, la periodicidad de la toma de registros fotográficos concuerda con la establecida por el presente estudio.³⁹

2.2.3 Adaptación de plantas de *Stipa Ichu* (Ichu) al medio de cultivo hidropónico.

Al ser plantas que crecen en el suelo, y al no contar con referencias bibliográficas de cultivos de plantas de Ichu en sistemas hidropónicos se necesitó realizar un experimento previo de aclimatación de las plantas al agua.

- Previa a la fase de recolección de plantas de Ichu se colectaron 10 plantas de las posibles zonas de recolección.
- Se formaron dos grupos de 03 plantas y fueron colocados en dos bandejas conteniendo la solución hidropónica utilizada en el experimento.
- Al ser los suelos altoandinos pobres en nutrientes y sales minerales se tomó la decisión de trabajar con diluciones a partir de la concentración inicial de las sales hidropónicas bajo la recomendación del Centro de Investigación de Hidroponía y Nutrición Mineral de la UNALM.³⁰ sobre la concentración recomendada para forraje verde.
- Las condiciones dadas fueron las siguientes:
 - Bandeja N°1
9.0 L de la solución hidropónica al 50% de la concentración inicial.
 - Bandeja N°2
9.0 L de la solución hidropónica al 25% de la concentración inicial.
- Las paredes de las bandejas fueron recubiertas con cartulina negra para proteger las raíces de la luz solar.

Archivo fotográfico del proceso de adaptación de las plantas de Ichu (ANEXO N° 5)

2.2.4 Determinación de pH.

El registro de pH se realizó mediante el uso de cinta medidora de pH PANPEHA[®] Aldrich. Fue registrado usando la siguiente tabla.

Tabla N°04: Registro semanal de pH tomado durante el experimento

ESPECIE	METALES	CC. ppm	pH Inicial	Semana de Experimentación					pH final
				1ra	2da	3ra	4ta	5ta	
TOTORA	Pb	20	6.0	5.5	5.5	6.0	6.0	6.0	6.0
		50	6.0	5.5	5.5	6.0	6.0	6.0	6.0
		80	6.0	6.0	5.5	5.5	5.5	6.0	6.0
	Cd	20	6.0	6.0	6.0	5.5	5.5	5.5	5.5
		50	6.0	6.0	6.0	5.5	5.5	5.5	5.5
		80	6.0	6.0	6.0	5.5	5.5	5.5	5.5
	Pb y Cd	20	6.0	6.0	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
		50	6.0	6.0	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
		80	6.0	6.0	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
ICHU	Pb	20	6.0	6.0	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
		50	6.0	6.0	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
		80	6.0	6.0	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
	Cd	20	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.5	6.5
		50	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.5	6.5
		80	6.0	6.0	6.0	6.5	6.5	6.5	6.5
	Pb y Cd	20	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
		50	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
		80	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	5.5	5.5
BLANCO	TOTORA	0	6.5	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
BLANCO	ICHU	0	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5

No se encontró en la literatura estudios que hagan referencia al comportamiento del pH registrado en el presente ensayo. Al no haber obtenido un cambio considerable en el pH se podría decir que no existió una correlación entre el cambio de pH y la cantidad de metales retenidos por las plantas o que el rango de detección del cambio de pH fuera

poco sensible, esto podría haber sido a causa del consumo de los metales por parte de las plantas, al tener preferencia por los metales con valencia similar a los cofactores enzimáticos utilizados en su metabolismo dejaron de lado los metales presentes en el medio de cultivo hidropónico utilizado los cuales, algunos de estos, generan acidez. Esto, sumado a la evaporación del agua, productos de la temperatura ambiental a la cual se trabajó el ensayo y el exudado de las plantas, producto de su propio metabolismo, podría ser la causa del comportamiento del pH.

En el caso de las plantas de Ichu que generaron ligera neutralización en el pH en la mayoría de los ensayos se podría atribuir al grado de concentración de sales adicionadas al medio de cultivo, por ser un medio pobre en sales hidropónicas pudo no afectar el comportamiento del pH, así mismo al ser una planta de baja actividad metabólica no generó gran cantidad de exudados que le suministraran acidez al medio de cultivo, la poca cantidad de metales absorbidos pudo generar la ligera neutralización observada en los resultados del comportamiento del pH.

Estudios realizados por Lasat, 2000 en la Universidad de Costa Rica indican que las plantas acumuladoras a través de las raíces segregan compuestos quelantes de metales, como los ácidos mugiénico y avénico, los cuáles funcionan principalmente como quelantes metálicos especializados llamados sideróforos (compuestos que facilitan la absorción del hierro). Sheoran *et al.*, 2011 nos dice que otras plantas por su parte, segregan compuestos como ácido cítrico, malónico y ácido oxálico que igualmente actúan como quelantes, pero a su vez disminuyen el pH del suelo, aumentando de esta forma la solubilidad de los metales, con lo que se incrementa su biodisponibilidad y la facilidad con que las plantas los introducen en sus tejidos vegetales⁴⁸, esto podría explicar el comportamiento del pH en el medio de cultivo.

2.2.5 Determinación de Temperatura.

El registro de temperatura se realizó mediante el uso de un termómetro digital de ambiente. La temperatura fue registrada haciendo uso de la siguiente tabla.

Tabla N°05: Registro diario de temperatura ambiental tomado en el invernadero durante el desarrollo del experimento. Hora del registro 12:00 pm

Día	Fecha	Temperatura (°C)	Día	Fecha	Temperatura (°C)
1	26/01/2013	23.49	18	12/02/2013	23.95
2	27/01/2013	23.34	19	13/02/2013	23.86
3	28/01/2013	22.69	20	14/02/2013	23.62
4	29/01/2013	22.51	21	15/02/2013	23.73
5	30/01/2013	22.53	22	16/02/2013	23.74
6	31/01/2013	22.8	23	17/02/2013	23.19
7	01/02/2013	23.73	24	18/02/2013	22.85
8	02/02/2013	23.35	25	19/02/2013	22.7
9	03/02/2013	22.82	26	20/02/2013	22.11
10	04/02/2013	23.6	27	21/02/2013	22.68
11	05/02/2013	24.06	28	22/02/2013	22.9
12	06/02/2013	24.55	29	23/02/2013	23.16
13	07/02/2013	24.41	30	24/02/2013	22.59
14	08/02/2013	24.8	31	25/02/2013	22.99
15	09/02/2013	25.68	32	26/02/2013	23.48
16	10/02/2013	24.98	33	27/02/2013	22.85
17	11/02/2013	24.12	34	28/02/2013	22.57

De acuerdo a estudios realizados en rizofiltración por la Comisión Nacional de Energía Atómica de Buenos Aires, Argentina la temperatura ambiente durante el ensayo fue de $23,6 \pm 1,5$ °C.⁴⁰

Estudios de tratamiento de aguas grises en humedales realizados por la Universidad Agraria La Molina se realizaron trabajos a temperaturas ambientales entre los 28.5 y 18°C⁴¹, dichos estudios demuestran que es factible llevar a cabo estudios de fitorremediación en sistemas hídricos usando temperaturas ambientales.

2.2.6 Determinación del consumo de medio de cultivo en el tiempo de experimentación.

El consumo de sustrato, fue medido empíricamente durante el proceso de toma de pH. Se utilizó la siguiente tabla:

Tabla N°06: Plantilla de registro de consumo de solución hidropónica por bandeja de experimentación.

ESPECIE	METALES	CC. ppm	Semana de Experimentación Absorción medio (Lts)					Consumo Total por bandeja
			1ra	2da	3ra	4ta	5ta	
TOTORA	Pb	20						
		50						
		80						
	Cd	20						
		50						
		80						
	Pb y Cd	20						
		50						

		80						
ICHU	Pb	20						
		50						
		80						
	Cd	20						
		50						
		80						
	Pb y Cd	20						
		50						
		80						
BLANCO	TOTORA	0						
	ICHU	0						

2.2.7 Determinación de metales pesados por espectrofotometría de absorción atómica.

a. Equipo.

Espectrofotómetro de Absorción Atómica y equipamiento asociado (Usar la cabeza del quemador recomendada por el fabricante)

b. Reactivos.

- *Aire*, limpiado y secado a través de un filtro adecuado para remover aceite, agua y otras sustancias foráneas. La fuente puede ser un compresor de aire o una botella comercial de gas.
- *Acetileno*, grado estándar comercial. Acetona, la cual siempre está presente en los cilindros de acetileno, puede ser prevenida de ingresar y dañar la cabeza del

quemador reemplazando el cilindro cuando su presión ha caído a 689 kPa de acetileno.

- *Agua libre de metales:* Usar agua libre de metales para la preparación de todos los reactivos y calibraciones estándares y como agua de dilución. Preparar el agua libre de metales por desionización del agua y/o usando uno de los siguientes procesos, dependiendo de la concentración de metal en la muestra: destilación simple, redestilación o sub-ebullición. Siempre revisar el agua desionizada o destilada para determinar si los elementos de interés están presentes en cantidades trazas (PRECAUCIÓN: Si la fuente de agua contiene Mercurio (Hg) u otro metal volátil, agua desionizada, destilada o redestilada podría no ser deseable para análisis de trazas porque estos metales son destilados juntos con el proceso de destilación de agua. En tales casos, usar agua a sub-ebullición para preparar agua libre de metales).
- *Solución de Calcio:* Disolver 630 mg de carbonato de calcio (CaCO_3), en 50 ml de 1+5 HCl. De ser necesario, calentar y hervir suavemente hasta obtener la solución completa. Enfriar y diluir a 1000 ml con agua.
- *Ácido Clorhídrico (HCl), concentrado.*
- *Solución de Lantano:* Disolver 58.65 g de óxido de lantano (La_2O_3), en 250 ml de HCl concentrado. Adicionar ácido lentamente hasta que el material esté disuelto y diluir a 1000 ml con agua.
- *Peróxido de Hidrógeno, 30%.*
- *Ácido Nítrico (HNO_3), concentrado.*
- *Agua Regia:* Adicionar 3 volúmenes de HCl concentrado a 1 volumen de HNO_3 concentrado.
- *Solución de Yodo, 1N:* Disolver 20 g de yoduro de potasio (KI) en 50 ml de agua, adicionar 12.7 g de Yodo y diluir a 100 ml.
- *Solución de Yoduro de Cianógeno (CNI):* En 50 ml de agua adicionar 6.5 g de cianuro de potasio (KCN), 5.0 ml de solución de Yodo 1 N y 4.0 ml de hidróxido de amonio (NH_4OH) concentrado. Mezclar y diluir a 100 ml con agua. Preparar una solución fresca cada 02 semanas.

- *Solución estándar de metales:* Preparar series de soluciones estándares de metales en el rango óptimo de concentración por dilución apropiada de las siguientes soluciones stock de metales con agua conteniendo 1.5 ml de HNO_3/Lt . Secar los reactivos exhaustivamente antes de usar. En general, usar reactivos de la más alta pureza. Para hidratos, usar reactivos frescos.
- *Cadmio (Cd):* Disolver 1.000 g de metal cadmio en un volumen mínimo de 1 + 1 HCl. Diluir a 1000 ml de agua; 1.00 ml = 1.00 mg de Cd.
- *Plomo (Pb):* Disolver 1.598 g de nitrato de plomo ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) en cerca de 200 ml de agua, adicionar 1.5 ml de HNO_3 concentrado y diluir a 1000 ml con agua; 1.00 ml = 1.00 mg Pb.

c. Procedimiento.

➤ **Operación de Instrumentos.**

A causa de las diferencias entre marcas y modelos de espectrofotómetros de absorción atómica, no es posible formular instrucciones aplicables a todos los instrumentos. Ver el manual de operaciones del fabricante. En general, proceder de acuerdo a lo siguiente: Instalar una lámpara de cátodo hueco para el metal deseado en el instrumento y raudamente colocar la longitud de onda de acuerdo al protocolo. Establecer el ancho de ranura de acuerdo con la sugerencia del fabricante para el elemento que se está midiendo. Encender el instrumento, aplicar a la lámpara de cátodo hueco la corriente sugerida por el fabricante, y dejar al instrumento calentarse hasta que la fuente de energía se estabilice, generalmente entre 10 y 20 minutos. Reajustar la corriente como sea necesario después del calentamiento. Optimizar la longitud de onda ajustando el rango hasta que se obtenga una ganancia de energía óptima.

Alinear la lámpara de acuerdo a las instrucciones del fabricante.

Instalar una cabeza de quemador adecuada y ajustar su posición. Encender el aire y ajustar el rango de flujo al especificado por el fabricante para dar máxima sensibilidad

para el metal siendo medido. Encender el acetileno, ajustar el rango de flujo al valor especificado, y encender la llama. Aspirar una solución estándar y ajustar el rango de aspiración del nebulizador para obtener la máxima sensibilidad. Atomizar el estándar (usualmente uno cerca del medio del rango de trabajo lineal) y ajustar el quemador a ambos lados, arriba y abajo para obtener máxima respuesta. Almacenar el valor de absorbancia de éste estándar cuando esté recién preparado y con una nueva lámpara de cátodo hueco. Referirse a ésta data en determinaciones subsecuentes del mismo elemento para comprobar la consistencia de la configuración del instrumento y el envejecimiento de la lámpara de cátodo hueco y el estándar.

El instrumento ahora está listo para operar. Cuando el análisis ha finalizado, extinguir la flama apagando primero el acetileno y luego el aire.

➤ **Estandarización.**

Seleccionar al menos tres concentraciones de cada estándar de solución del metal, poner entre paréntesis la concentración de metal esperado de una muestra. Aspirar cada una a su vez en la llama y registre la absorbancia.

Preparar una curva de calibración graficando en papel milimetrado la absorbancia de los estándares contra sus concentraciones. Para los instrumentos equipados con lectura de concentración directa, este paso es innecesario. Con algunos instrumentos pueda ser necesario convertir porcentaje de absorción a absorbancia usando una tabla generalmente provista por el fabricante.

Revisar los estándares periódicamente durante las corridas. Volver a revisar la curva de calibración por aspiración al menos un estándar después de completar un análisis de un grupo de muestras. Para instrumentos con memoria interna, ingresar uno a tres estándares para registrar una curva de calibración para su uso en el análisis posterior de la muestra.

➤ **Análisis de muestras.**

Enjuague el nebulizador aspirando agua conteniendo 1.5 ml de ácido nítrico (HNO_3/L) concentrado. Atomizar el blanco y llevar el instrumento a cero. Atomizar la muestra y determinar su absorbancia.

Analizar los estándares al principio y final de la corrida y en intervalos durante largas corridas. Correr el blanco o un solvente entre cada muestra o estándar para verificar la estabilidad de la línea base. Determinar la concentración del metal desde la curva de calibración.

d. Cálculos.

Calcular la concentración de cada ion metálico en microgramos por litro, haciendo referencia a la curva de calibración apropiada.

2.2.8 Método estadístico: Análisis de Varianza para un factor (ANOVA).

El análisis estadístico fue seleccionado en base a la cantidad de tratamientos aplicados y el número de repeticiones realizadas por ensayo.

El análisis de varianza (ANOVA) de un factor nos sirve para comparar varios grupos en una variable cuantitativa. Esta prueba es una generalización del contraste de igualdad de medias para dos muestras independientes. Se aplica para contrastar la igualdad de medias de tres o más poblaciones independientes y con distribución normal. Supuestas k poblaciones independientes, las hipótesis a contrastar son las siguientes:

- H_0 : Las medias poblacionales son iguales
- H_1 : Al menos dos medias poblacionales son distintas

Para realizar el contraste ANOVA, se requieren N muestras independientes de la variable de interés. Una variable de agrupación denominada Factor y clasifica las observaciones de la variable en las distintas muestras.

Para el desarrollo del análisis estadístico se tomaron en cuenta 03 factores:

- Los metales pesados estudiados.
- Las plantas estudiadas.
- La interacción entre los metales pesados y las plantas estudiadas.

A continuación se presentan las hipótesis independientes para cada factor analizado:

a. Para Concentraciones.

H₀: La cantidad de metal absorbido es igual en las 3 concentraciones

H₁: Por lo menos hay una concentración cuya cantidad de metal absorbida difiere de las otras concentraciones.

b. Para plantas (tallos/raíces).

H₀: La cantidad de metal absorbida en promedio es igual en los tallos/raíces de las 2 plantas

H₁: La cantidad de metal absorbida es diferente en los dos tallos/raíces.

c. Para Aditividad (interacción).

H₀: No existe interacción entre las concentraciones y los tallos/raíces, es decir, el efecto de las concentraciones sobre la cantidad de metal absorbida no depende del tipo de tallo/raíz.

H₁: Si hay interacción entre las concentraciones y los tallos/raíces, es decir, el efecto de las concentraciones sobre la cantidad de metal absorbida depende del tipo de tallo/raíz.

CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1 Recolección de plantas Altoandinas *Stipa ichu* (Ichu) y *Scirpus californicus* (Totora).

3.1.1. Resultados.

Las plantas recolectadas, en una misma zona, llegaron en buenas condiciones a la ciudad de Lima. El método de traslado fue eficiente, se llevó a cabo una selección de las que presentaban mejores condiciones físicas, y se dio inicio a una fase de adaptación.

El método de extracción aplicado para cada especie demostró ser eficiente debido a que la mayoría de las plantas llegaron en condiciones óptimas.

3.1.2. Discusión.

Siguiendo la Metodología de recolección del Instituto de Biodiversidad²⁸ se realizó una recolección manual de las plantas de Ichu ya que al ser plantas pequeñas y de fácil acceso no fue necesario utilizar ninguna maquinaria en especial.

De acuerdo a la metodología citada en el artículo de Técnicas de Recolección de Plantas y Herborización³², el sistema de recolección de plantas acuáticas coincide con la metodología aplicada en las plantas de Totora.

3.2 Aclimatación de plantas de *Stipa Ichu* (Ichu) al medio de cultivo hidropónico.

3.2.1 Resultados.

Luego de 02 semanas de adaptación de las plantas de Ichu al sistema hidropónico, se comparó el desarrollo de las plantas frente al desarrollo en tierra extraída del mismo lugar de recolección, se observó cierto deterioro en el sistema hidropónico a pesar de apreciarse un decaimiento progresivo en ambos sistemas tanto hidropónico como en tierra extraída del lugar de recolección, el deterioro en el sistema hidropónico fue mucho más leve. En el anexo N°06 se registraron los cambios mencionados respecto a la fisionomía de las plantas en fase de adaptación donde se pudo observar la coloración amarilla de las plantas en tierra sin haber sido regadas.

3.2.2 Discusión.

No se encontraron estudios referentes de adaptabilidad del Ichu en sistemas hidropónicos, por tal motivo los resultados obtenidos carecen de respaldo científico aportando nueva información para futuras investigaciones.

3.3 Determinación del consumo de medio de cultivo en el tiempo de experimentación.

3.3.1 Resultados.

El consumo de sustrato fue determinado empíricamente haciendo uso de una graduación empírica generada durante el llenado de las bandejas con el medio de cultivo.

Los datos registrados se presentan a continuación:

Tabla N°07: Registro del consumo semanal de solución hidropónica por bandeja de experimentación.

ESPECIE	METALES	CC. ppm	Semana de Experimentación Absorción medio (Lts)					Consumo Total por bandeja
			1ra	2da	3ra	4ta	5ta	
TOTORA	Pb	20	0	1	1	1	1.5	4.5
		50	0	1	1	1	1.5	4.5
		80	0	2	1	2	2	7
	Cd	20	0	0.5	0	0.3	0.5	1.3
		50	0	0.5	0	0.3	0.5	1.3
		80	0	0.5	0	0.3	0.5	1.3
	Pb y Cd	20	0	1.5	0.5	0.3	0.5	2.8
		50	0	1	0.5	0.3	0	1.8
		80	0	1	0.5	0.3	0.5	2.3
ICHU	Pb	20	0	0.5	0.5	0.5	0.5	2
		50	0	0	0.5	0.5	0.5	1.5
		80	0	0.5	0	0.5	0.5	1.5
	Cd	20	0	0.5	0.5	0.5	0.5	2
		50	0	0	0.5	0.5	0.5	1.5
		80	0	0.5	0.5	0.5	0.5	2
	Pb y Cd	20	0	0.5	0.5	0.5	0.5	2
		50	0	0.5	0.5	0.5	0.5	2
		80	0	1	0.5	0.5	0.5	2.5
BLANCO	TOTORA	0	0	0.5	1	1	1	3.5
	ICHU	0	0	0.5	1	1	1	3.5

El volumen de medio de cultivo detallado en la columna de consumo total por bandeja fue la cantidad adicionada a cada bandeja para completar el volumen inicial de 9 lts.

3.3.2 Discusión.

El consumo del medio se pudo dar probablemente a la evaporación del agua provocada por la temperatura y la evapotranspiración generada por las plantas. El mayor consumo se dio en las plantas de Totora con tratamiento de Pb probablemente por ser plantas con mayor tamaño de raíces y hojas, motivo por el cual, deberían de realizar un proceso de evapotranspiración mayor a las plantas de Ichu.

Estudios realizados bajo condiciones similares de temperatura en rizofiltración por la Comisión Nacional de Energía Atómica de Buenos Aires, Argentina⁴⁰, señalan un consumo de agua similar a los valores registrados.

La transpiración y el contenido relativo de agua disminuyeron significativamente por las concentraciones excesivas de los metales pesados. Se concluyó que las concentraciones excesivas de los metales pesados afectaron significativamente el estado del agua de la planta, causando déficit hídrico y cambios subsecuentes en las plantas. El efecto más intenso sobre las plantas fue ejercido por Cd, menos intenso por Cu y Zn y el menos intenso por Pb.⁵⁴ En el presente estudio se pudo evidenciar un comportamiento similar al descrito en la investigación realizada al ser las plantas expuestas al tratamiento con Pb las de mayor consumo de agua.

3.4 Determinación de metales pesados por Absorción Atómica.

3.4.1 Resultados.

Mediante la aplicación de la técnica de espectrofotometría de absorción atómica se logró determinar la cantidad de metal pesado absorbido en el tratamiento aplicado a las plantas en experimentación.

Los resultados del análisis se detallan en las siguientes tablas:

Tabla N°08: Resultados de las pruebas de absorción atómica realizados a las plantas de Totora.

TOTORA				
LEYENDA			CODIGO	RESULTADOS (ppm)
METAL	PARTE DE LA PLANTA	CC.(ppm)		
Cd	Raíz	20	CDR-2T	0.0261
Cd	Tallo	20	CDT-2T	0.0312
Cd	Raíz	50	CDR-5T	0.0188
Cd	Tallo	50	CDT-5T	0.0106
Cd	Raíz	80	CDR-8T	0.0411
Cd	Tallo	80	CDT-8T	0.0273
<u>Cd</u> /Pb	Raíz	20	PCRC-2T	0.1900
<u>Cd</u> /Pb	Tallo	20	PCTC-2T	0.1606
<u>Cd</u> /Pb	Raíz	50	PCRC-5T	0.0313
<u>Cd</u> /Pb	Tallo	50	PCTC-5T	0.0249
<u>Cd</u> /Pb	Raíz	80	PCRC-8T	0.0189
<u>Cd</u> /Pb	Tallo	80	PCTC-8T	0.0115
Blanco	Raíz	0	CDR-BLT	0.0098
Blanco	Tallo	0	CDT-BLT	0.0075
Pb	Raíz	20	PBR-2T	1.0961
Pb	Tallo	20	PBT-2T	0.8849
Pb	Raíz	50	PBR-5T	0.7395
Pb	Tallo	50	PBT-5T	0.8911

Pb	Raíz	80	PBR-8T	1.1022
Pb	Tallo	80	PBT-8T	1.0673
Cd/ <u>Pb</u>	Raíz	20	PCRP-2T	0.4036
Cd/ <u>Pb</u>	Tallo	20	PCTP-2T	0.5129
Cd/ <u>Pb</u>	Raíz	50	PCRP-5T	0.7623
Cd/ <u>Pb</u>	Tallo	50	PCTP-5T	0.8247
Cd/ <u>Pb</u>	Raíz	80	PCRP-8T	2.0910
Cd/ <u>Pb</u>	Tallo	80	PCTP-8T	1.4836
Blanco	Raíz	0	PBR-BLT	0.4012
Blanco	Tallo	0	PBT-BLT	0.3951

Tabla N°09: Resultados de las pruebas de absorción atómica realizados a las plantas de Ichu.

ICHU				
LEYENDA			CODIGO	RESULTADOS (ppm)
METAL	PARTE DE LA PLANTA	CC. (ppm)		
Cd	Raíz	20	CDR-2U	0.0701
Cd	Tallo	20	CDT-2U	0.0412
Cd	Raíz	50	CDR-5U	0.0381
Cd	Tallo	50	CDT-5U	0.0226
Cd	Raíz	80	CDR-8U	0.0367
Cd	Tallo	80	CDT-8U	0.0326
<u>Cd/Pb</u>	Raíz	20	PCRC-2U	0.0273
<u>Cd/Pb</u>	Tallo	20	PCTC-2U	0.0186
<u>Cd/Pb</u>	Raíz	50	PCRC-5U	0.0144
<u>Cd/Pb</u>	Tallo	50	PCTC-5U	0.0099
<u>Cd/Pb</u>	Raíz	80	PCRC-8U	0.0211

<u>Cd/Pb</u>	Tallo	80	PCTC-8U	0.0181
Cd	Raíz	0	CDR-BLU	0.0109
Cd	Tallo	0	CDT-BLU	0.0830
Pb	Raíz	20	PBR-2U	0.0303
Pb	Tallo	20	PBT-2U	0.0216
Pb	Raíz	50	PBR-5U	0.0275
Pb	Tallo	50	PBT-5U	0.0331
Pb	Raíz	80	PBR-8U	0.0217
Pb	Tallo	80	PBT-8U	0.0179
Cd/ <u>Pb</u>	Raíz	20	PCRP-2U	0.0227
Cd/ <u>Pb</u>	Tallo	20	PCTP-2U	0.0182
Cd/ <u>Pb</u>	Raíz	50	PCRP-5U	0.0166
Cd/ <u>Pb</u>	Tallo	50	PCTP-5U	0.0134
Cd/ <u>Pb</u>	Raíz	80	PCRP-8U	0.0931
Cd/ <u>Pb</u>	Tallo	80	PCTP-8U	0.0369
Pb	Raíz	0	PBR-BLU	0.0106
Pb	Tallo	0	PBT-BLU	0.0093

Figura N°01 Fase inicial y final del experimento completo del cultivo hidropónico en Totora



De manera general se observó pérdida de color y turgencia de las hojas, tallos y raíces de las plantas sometidas a los tratamientos con los metales pesados, principalmente las plantas expuestas al Cd.

Figura N°02 Fase inicial y final del cultivo de Totora contaminado con Pb



En la exposición de las plantas de totora al Pb se observó mayor tolerabilidad de las plantas al metal, evidenciando pocos cambios a nivel morfofisiológico de las mismas.

Figura N°03 Fase inicial y final del cultivo de Totora contaminado con Cd.



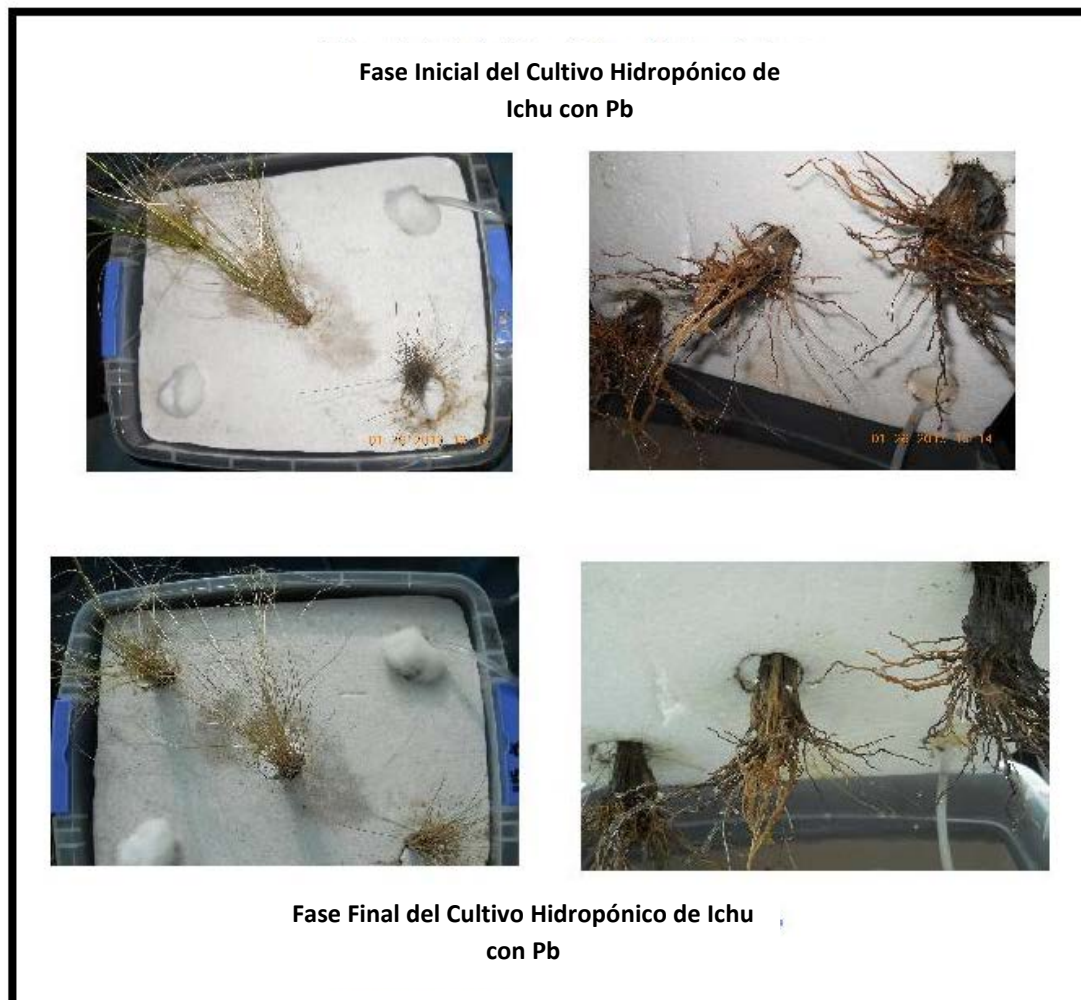
En la exposición de las plantas de totora al Cd se observó mayor toxicidad de las plantas al metal, evidenciando cambios marcados a nivel morfofisiológico de las mismas.

Figura N°04 Fase inicial y final del cultivo de Totora contaminado con Pb/Cd



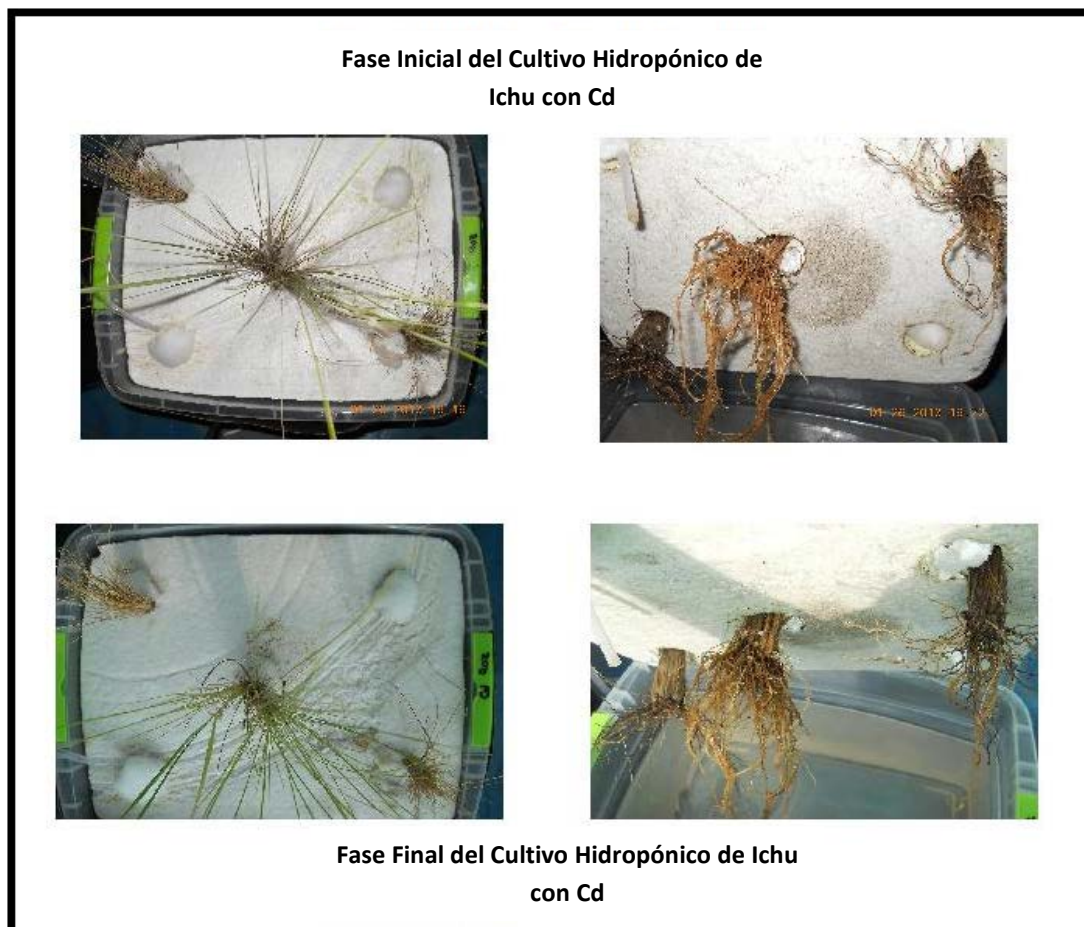
En la exposición de las plantas de totora al Pb/Cd se observó un alto grado de toxicidad de las plantas a los metales, evidenciando cambios marcados a nivel morfofisiológico de las mismas.

Figura N°05 Fase inicial y final del cultivo hidropónico de Ichu con Pb



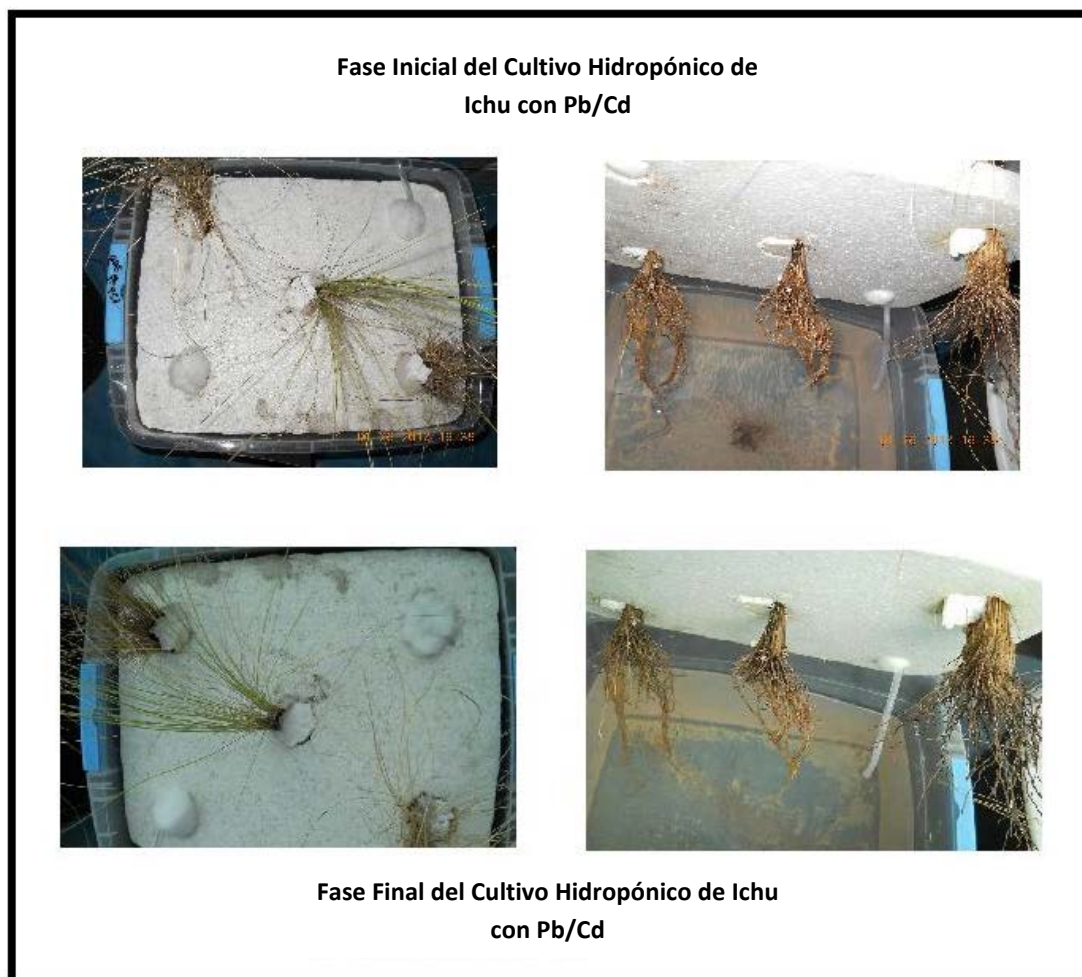
En la exposición de las plantas de Ichu al Pb se observó un marcado deterioro de las raíces y hojas así como también un ennegrecimiento de las raíces, evidenciando cambios a nivel morfofisiológico de las mismas.

Figura N°06 Fase inicial y final del cultivo hidropónico de Ichu con Cd



En la exposición de las plantas de ichu al Cd se observó un marcado deterioro de las raíces y hojas así como también un ennegrecimiento de las raíces, evidenciando cambios a nivel morfofisiológico de las mismas.

Figura N°07 Fase inicial y final del cultivo hidropónico de Ichu con Pb/Cd



En la exposición de las plantas de ichu al Pb/Cd se pudo observar un marcado deterioro de las raíces y hojas así como también un ennegrecimiento de las raíces, evidenciando cambios a nivel morfofisiológico de las mismas.

3.4.2 Discusión.

La máxima cantidad de Pb absorbida por las plantas de Totorá e Ichu se dio en las raíces de las mismas, tales resultados concuerdan con los resultados obtenidos por

investigadores de la Universidad de Valdivia Chile 2004 en cuyo trabajo de investigación de Determinación de metales trazas en *Scirpus Californicus* indican que se pudo determinar que la mayor concentración se observa en la porción analizada correspondiente a la raíz.¹⁸

Existe la posibilidad de que se haya dado un incremento de la absorción del metal Pb en presencia de Cd, debido al incremento de la concentración de metales absorbida evidenciada frente al tratamiento que contenía solo Pb el cual fue menor, este comportamiento se observó en ambas plantas, este incremento en la acumulación del Pb y la disminución de Cd podría deberse a que al estar los dos metales presentes en el medio a disposición de las plantas éstas hayan optado por bioacumular el de mayor facilidad o disponibilidad para ellas.

3.5 Método estadístico ANOVA.

3.5.1 Resultados.

Pruebas de ANOVA de los resultados de absorción atómica en plantas de Totorá e Ichu:

- Las tablas están agrupadas según los tratamientos de metales pesados analizados: Pb, Cd, Pb en tratamiento Pb/Cd y Cd en tratamiento Pb/Cd.
- Están agrupados según parte de planta analizada, raíces o tallos.
- Se compara a Ichu con Totorá en cada cuadro, con la misma concentración y por parte de la planta evaluada.

Tabla N°10: Prueba de ANOVA para la Determinación de la Relación entre las Concentraciones de Pb en Tallos de Totora e Ichu.

MUESTRAS DE Pb			
TALLO			
CC (PPM)	TOTORA	ICHU	TOTAL
20	0.4898	0.0123	0.5021
50	0.4960	0.0238	0.5198
80	0.6722	0.0086	0.6808
TOTAL	1.6580	0.0447	1.7027
PROM	0.5527	0.0149	

Σx^2	0.9385646
SC_{TOTAL}	0.4553667
SC_{CC}	0.0096947
SC_{TALLO}	0.4337895
$SC_{RESIDUAL}$	0.0118825
SC_N	0.0117279
SC_{ERROR}	0.0001546

TABLA DE ANOVA PARA LA COMPARACION DE Pb EN TALLOS DE ICHU Y TOTORA				
TOTORA				
FUENTES	G.L.	SUMA DE CUADRADOS	MEDIA CUADRATICA	F
CONCENTRACIONES	2	0.0096947	0.0048473	31.3519
TALLOS	1	0.4337895	0.4337895	2805.6925
NO ADITIVIDAD	1	0.0117279	0.0117279	75.8547
ERROR	1	0.0001546	0.0001546	
TOTAL	5			

$F_{0.05}(2,1) = 200$, $F_{0.05}(1,1) = 161$

Según los resultados estadísticos:

- La cantidad de metal absorbido es igual en las 3 concentraciones.
- La cantidad de metal absorbido en promedio es igual en los de los 2 tallos.
- No hay interacción entre las concentraciones y los tallos, es decir, el efecto de las concentraciones sobre la cantidad de metal absorbida no depende del tipo de tallo.

Tabla N°11: Prueba de ANOVA para la Determinación de la Relación entre las Concentraciones de Pb en Raíces de Totorá e Ichu.

MUESTRAS DE Pb			
RAIZ			
CC (PPM)	TOTORA	ICHU	TOTAL
20	0.6949	0.0197	0.7146
50	0.3383	0.0169	0.3552
80	0.7010	0.0111	0.7121
TOTAL	1.7342	0.0477	1.7819
PROM	0.5781	0.0159	

Σx^2	1.0895308
SC _{TOTAL}	0.5603362
SC _{CC}	0.0427587
SC _{RAIZ}	0.4740470
SC _{RESIDUAL}	0.0435305
SC _N	0.0434563
SC _{ERROR}	0.0000741

TABLA DE ANOVA PARA LA COMPARACION DE Pb EN RAICES DE ICHU Y TOTORA				
TOTORA				
FUENTES	G.L.	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADOS MEDIOS	F
CONCENTRACIONES	2	0.0427587	0.0213794	288.3744
RAICES	1	0.4740470	0.4740470	6394.1607
NO ADITIVIDAD	1	0.0434563	0.0434563	586.1586
ERROR	1	0.0000741	0.0000741	
TOTAL	5			

$F_{0.05} (2,1) = 200$; $F_{0.05} (1,1) = 161$; $F_{0.01} (2,1) = 5000$

Según los resultados estadísticos:

- La cantidad de metal absorbido es diferente en por lo menos una de las 3 concentraciones.
- La cantidad de metal absorbido en promedio es diferente en los de las 2 raíces.
- Si hay interacción entre las concentraciones y las raíces, es decir, el efecto de las concentraciones sobre la cantidad de metal absorbida depende del tipo de raíz.

Tabla N°12: Prueba de ANOVA para la Determinación de la Relación entre las Concentraciones de Cd en Tallos de Totora e Ichu.

MUESTRAS DE Cd			
TALLO			
CC (PPM)	TOTORA	ICHU	TOTAL
20	0.0237	0.0329	0.0566
50	0.003	0.0143	0.0173
80	0.0198	0.0243	0.0441
TOTAL	0.0465	0.0715	0.1180
PROM	0.0155	0.0238	

Σx^2	0.0028401
SC_{TOTAL}	0.0005195
SC_{CC}	0.0004032
SC_{TALLO}	0.0001042
$SC_{RESIDUAL}$	0.0000121
SC_N	0.0000029
SC_{ERROR}	0.0000092

TABLA DE ANOVA PARA LA COMPARACION DE Cd EN TALLOS DE ICHU Y TOTORA				
FUENTES	G.L.	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADOS MEDIOS	F
CONCENTRACIONES	2	0.0004032	0.0002016	21.9136
TALLOS	1	0.0001042	0.0001042	11.3238
NO ADITIVIDAD	1	0.0000029	0.0000029	0.3179
ERROR	1	0.0000092	0.0000092	
TOTAL	5			

$$F_{0.05} (2,1) = 200 ; F_{0.05} (1,1) = 161$$

Según los resultados estadísticos:

- La cantidad de metal absorbido es igual en las 3 concentraciones.
- La cantidad de metal absorbido en promedio es igual en los de los 2 tallos.

- No hay interacción entre las concentraciones y los tallos, es decir, el efecto de las concentraciones sobre la cantidad de metal absorbida no depende del tipo de tallo.

Tabla N°13: Prueba de ANOVA para la Determinación de la Relación entre las Concentraciones de Cd en raíces de Tatora e Ichu.

MUESTRAS DE Cd			
RAIZ			
CC (PPM)	TOTORA	ICHU	TOTAL
20	0.0163	0.0592	0.0755
50	0.009	0.0272	0.0362
80	0.0313	0.0258	0.0571
TOTAL	0.0566	0.1122	0.1688
PROM	0.0189	0.0374	

Σx^2	0.0062365
SC_{TOTAL}	0.0014876
SC_{CC}	0.0003866
SC_{RAIZ}	0.0005152
$SC_{RESIDUAL}$	0.0005857
SC_N	0.0001340
SC_{ERROR}	0.0004517

TABLA DE ANOVA PARA LA COMPARACION DE Cd EN RAICES DE ICHU Y TOTORA				
TOTORA				
FUENTES	G.L.	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADOS MEDIOS	F
CONCENTRACIONES	2	0.0003866	0.0001933	0.4280
RAICES	1	0.0005152	0.0005152	1.1407
NO ADITIVIDAD	1	0.0001340	0.0001340	0.2968
ERROR	1	0.0004517	0.0004517	
TOTAL	5			

$F_{0.05} (2,1) = 200$; $F_{0.05} (1,1) = 161$

Según los resultados estadísticos:

- La cantidad de metal absorbido es igual en las 3 concentraciones.

- La cantidad de metal absorbido en promedio es igual en las 2 raíces.
- No hay interacción entre las concentraciones y las raíces, es decir, el efecto de las concentraciones sobre la cantidad de metal absorbida no depende del tipo de raíz.

Tabla N°14: Prueba de ANOVA para la Determinación de la Relación entre las Concentraciones de Pb en Muestras de Cd/Pb en Tallos de Totora e Ichu.

MUESTRAS Cd/Pb (Pb)			
TALLO			
CC (PPM)	TOTORA	ICHU	TOTAL
20	0.1178	0.0089	0.1267
50	0.4296	0.0041	0.4337
80	1.0885	0.0276	1.1161
TOTAL	1.6359	0.0406	1.6765
PROM	0.5453	0.0135	

Σx^2	1.3841230
SC _{TOTAL}	0.9156810
SC _{CC}	0.2564719
SC _{TALLO}	0.4241637
SC _{RESIDUAL}	0.2350455
SC _N	0.2349024
SC _{ERROR}	0.0001430

TABLA DE ANOVA PARA LA COMPARACION DE Pb EN TALLOS DE ICHU Y TOTORA				
FUENTES	G.L.	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADOS MEDIOS	F
CONCENTRACIONES	2	0.2564719	0.1282359	896.6399
TALLOS	1	0.4241637	0.4241637	2965.7997
NO ADITIVIDAD	1	0.2349024	0.2349024	1642.4640
ERROR	1	0.0001430	0.0001430	
TOTAL	5			

$$F_{0.05} (2,1) = 200 ; F_{0.05} (1,1) = 161$$

Según los resultados estadísticos:

- La cantidad de metal absorbido es diferente en por lo menos una de las 3 concentraciones.
- La cantidad de metal absorbido en promedio es diferente en los 2 tallos.
- Si hay interacción entre las concentraciones y los tallos, es decir, el efecto de las concentraciones sobre la cantidad de metal absorbida depende del tipo de tallo.

Tabla N°15: Prueba de ANOVA para la Determinación de la Relación entre las Concentraciones de Pb en Muestras de Cd/Pb en Raíces de Totorá e Ichu.

MUESTRAS Cd/Pb (Pb)			
RAIZ			
CC (PPM)	TOTORA	ICHU	TOTAL
20	0.0024	0.0121	0.0145
50	0.3611	0.0060	0.3671
80	1.6898	0.0825	1.7723
TOTAL	2.0533	0.1006	2.1539
PROM	0.6844	0.0335	

ΣX^2	2.9928117
SC_{TOTAL}	2.2195975
SC_{CC}	0.8647958
SC_{RAIZ}	0.6355062
$SC_{RESIDUAL}$	0.7192955
SC_N	0.7188085
SC_{ERROR}	0.0004870

TABLA DE ANOVA PARA LA COMPARACION DE Pb EN RAICES DE ICHU Y TOTORA				
FUENTES	G.L.	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADOS MEDIOS	F
CONCENTRACIONES	2	0.8647958	0.4323979	887.8635
RAICES	1	0.6355062	0.6355062	1304.9156
NO ADITIVIDAD	1	0.7188085	0.7188085	1475.9642
ERROR	1	0.0004870	0.0004870	
TOTAL	5			

$$F_{0.05} (2,1) = 200 ; F_{0.05} (1,1) = 161$$

Según los resultados estadísticos:

- La cantidad de metal absorbido es diferente en por lo menos una de las 3 concentraciones.
- La cantidad de metal absorbido en promedio es diferente en las 2 raíces.
- Si hay interacción entre las concentraciones y las raíces, es decir, el efecto de las concentraciones sobre la cantidad de metal absorbida depende del tipo de raíz.

Tabla N°16: Prueba de ANOVA para la Determinación de la Relación entre las Concentraciones de Cd en Muestras de Cd/Pb en Tallos de Totora e Ichu.

MUESTRAS Cd/Pb (Cd)			
TALLO			
CC (PPM)	TOTORA	ICHU	TOTAL
20	0.1531	0.0103	0.1634
50	0.0174	0.0016	0.0190
80	0.0040	0.0098	0.0138
TOTAL	0.1745	0.0217	0.1962
PROM	0.0582	0.0072	

Σx^2	0.0239631
SC _{TOTAL}	0.0175473
SC _{CC}	0.0072098
SC _{TALLO}	0.0038913
SC _{RESIDUAL}	0.0064463
SC _N	0.0063764
SC _{ERROR}	0.0000699

TABLA DE ANOVA PARA LA COMPARACION DE Cd EN TALLOS DE ICHU Y TOTORA				
FUENTES	G.L.	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADOS MEDIOS	F
CONCENTRACIONES	2	0.0072098	0.0036049	51.5944
TALLOS	1	0.0038913	0.0038913	55.6939
NO ADITIVIDAD	1	0.0063764	0.0063764	91.2613
ERROR	1	0.0000699	0.0000699	
TOTAL	5			

$$F_{0.05} (2,1) = 200 ; F_{0.05} (1,1) = 161$$

Según los resultados estadísticos:

- La cantidad de metal absorbido es igual en las 3 concentraciones.
- La cantidad de metal absorbido en promedio es igual en los 2 tallos.
- No hay interacción entre las concentraciones y los tallos, es decir, el efecto de las concentraciones sobre la cantidad de metal absorbida no depende del tipo de tallo.

Tabla N°17: Prueba de ANOVA para la Determinación de la Relación entre las Concentraciones de Cd en Muestras de Cd/Pb en raíces de Totora e Ichu.

MUESTRAS Cd/Pb (Cd)			
RAIZ			
CC (PPM)	TOTORA	ICHU	TOTAL
20	0.1802	0.0164	0.1966
50	0.0215	0.0035	0.0250
80	0.0091	0.0102	0.0193
TOTAL	0.2108	0.0301	0.2409
PROM	0.0703	0.0100	

Σx^2	0.0334024
SC_{TOTAL}	0.0237302
SC_{CC}	0.0101524
SC_{RAIZ}	0.0054421
$SC_{RESIDUAL}$	0.0081357
SC_N	0.0080866
SC_{ERROR}	0.0000491

TABLA DE ANOVA PARA LA COMPARACION DE Cd EN RAICES DE ICHU Y TOTORA				
FUENTES	G.L.	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADOS MEDIOS	F
CONCENTRACIONES	2	0.0101524	0.0050762	103.3231
RAICES	1	0.0054421	0.0054421	110.7705
NO ADITIVIDAD	1	0.0080866	0.0080866	164.5985
ERROR	1	0.0000491	0.0000491	
TOTAL	5			

$F_{0.05} (2,1) = 200$; $F_{0.05} (1,1) = 161$

Según los resultados estadísticos:

- La cantidad de metal absorbido es igual en las 3 concentraciones.
- La cantidad de metal absorbido en promedio es igual en las 2 raíces.
- Si hay interacción entre las concentraciones y las raíces, es decir, el efecto de las concentraciones sobre la cantidad de metal absorbida no depende del tipo de raíz.

Tabla N° 18: Promedios acumulados de retención de metales pesados en Totora e Ichu a los 34 días de realizado el experimento.

MUESTRA	PARTE PLANTA	PROMEDIO (ppm)	
		TOTORA	ICHU
Pb	RAIZ	0.5781	0.0160
Pb	TALLO	0.5526	0.0150
Cd	RAIZ	0.0188	0.0373
Cd	TALLO	0.0156	0.0238
Pb/Cd	Pb RAIZ	0.6843	0.0335

Pb/Cd	Pb	TALLO	0.5454	0.0135
Pb/Cd	Cd	RAIZ	0.0702	0.0100
Pb/Cd	Cd	TALLO	0.0582	0.0072

Tablas de resultados expresados en PORCENTAJES respecto a la retención de Cd y Pb medidos por absorción atómica en plantas de Totora e Ichu agrupadas por los metales analizados.

Tabla N°19: Porcentaje de retención de Pb medido por absorción atómica en Totora e Ichu, analizados en tallos.

MUESTRAS DE Pb				
TALLOS				
CC (ppm)	TOTORA (ppm)	%	ICHU (ppm)	%
20	0.4898	2.449	0.0123	0.062
50	0.4960	0.992	0.0238	0.048
80	0.6722	0.840	0.0086	0.011

Tabla N°20: Porcentaje de retención de Pb medido por absorción atómica en Totora e Ichu, analizados en raíces.

MUESTRAS DE Pb				
RAIZ				
CC (ppm)	TOTORA (ppm)	%	ICHU (ppm)	%
20	0.6949	3.475	0.0197	0.099
50	0.3383	0.677	0.0169	0.034
80	0.7010	0.876	0.0111	0.014

Figura N°08: Porcentaje de Retención de Pb en tallos y raíces de Totora.

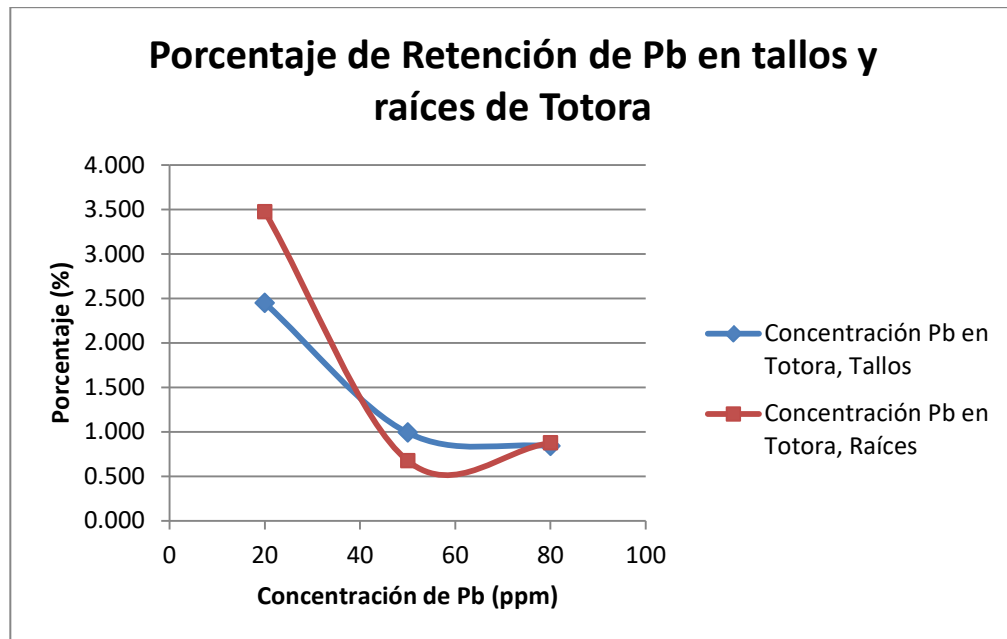


Figura N°09: Porcentaje de Retención de Pb en tallos y raíces de Ichu.

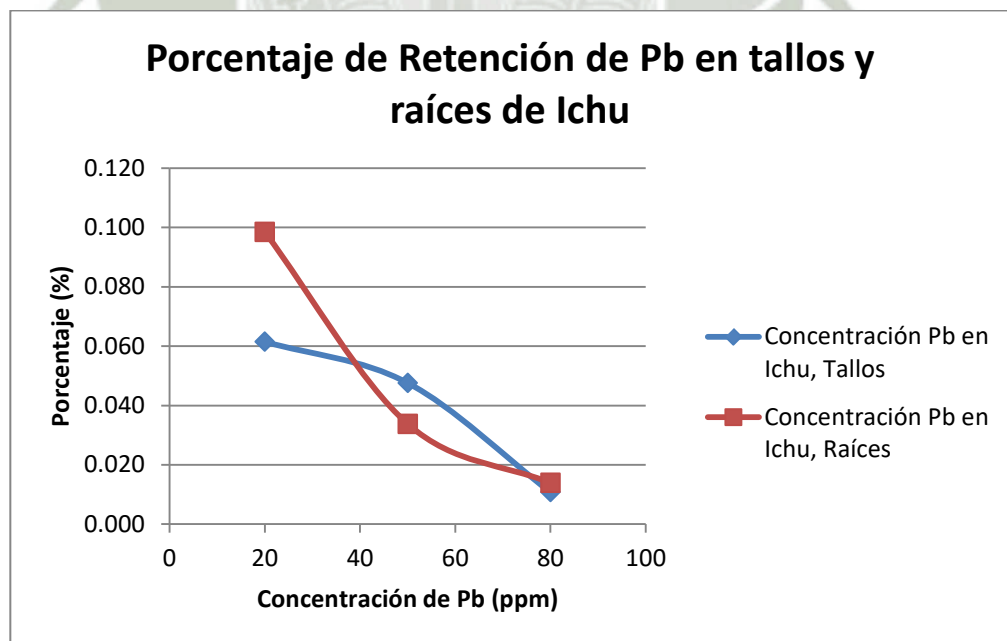


Tabla N°21: Porcentaje de retención de Cd medido por absorción atómica en Totora e Ichu, analizados en tallos.

MUESTRAS DE Cd				
TALLOS				
CC (ppm)	TOTORA (ppm)	%	ICHU (ppm)	%
20	0.0237	0.119	0.0329	0.165
50	0.003	0.006	0.0143	0.029
80	0.0198	0.025	0.0243	0.030

Tabla N°22: Porcentaje de retención de Cd medido por absorción atómica en Totora e Ichu, analizados en raíces.

MUESTRAS DE Cd				
RAÍCES				
CC (ppm)	TOTORA (ppm)	%	ICHU (ppm)	%
20	0.0163	0.082	0.0592	0.296
50	0.009	0.018	0.0272	0.054
80	0.0313	0.039	0.0258	0.032

Figura N°10: Porcentaje de Retención de Cd en tallos y raíces de Totorá.

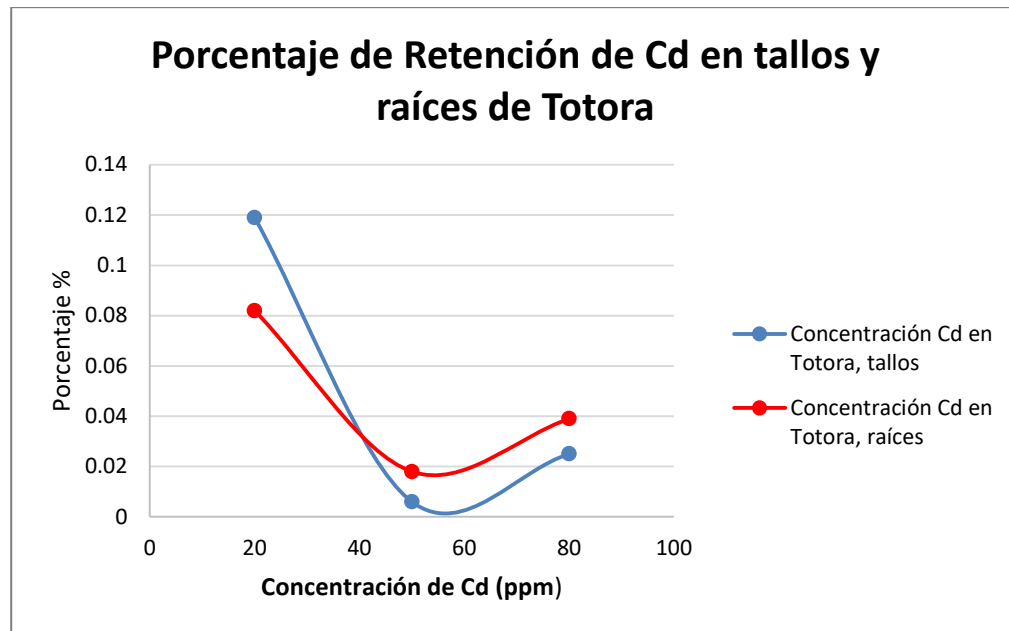


Figura N°11: Porcentaje de Retención de Cd en tallos y raíces de Ichu.

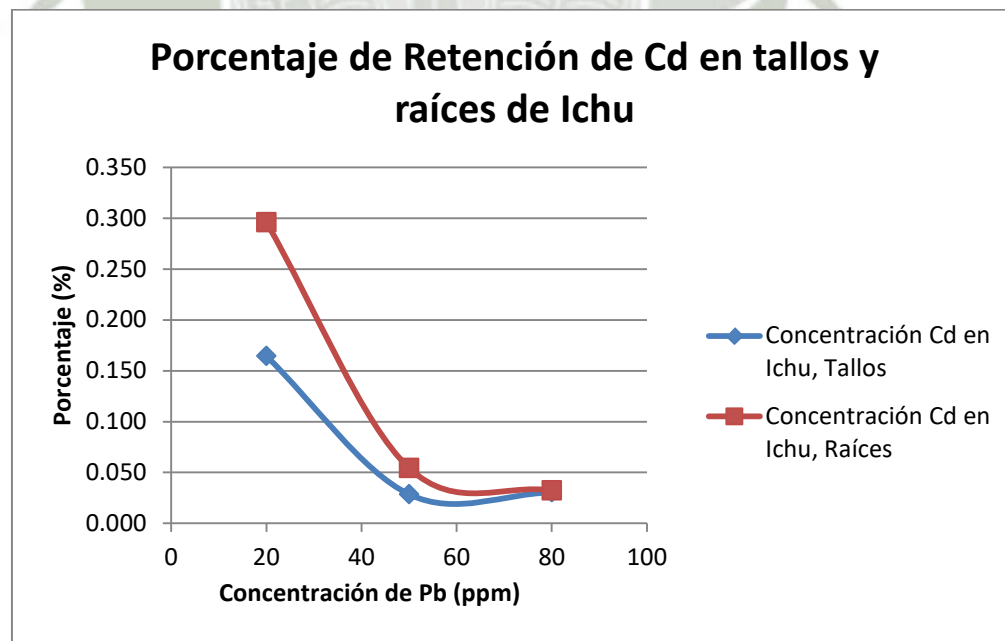


Tabla N°23: Porcentaje de retención de Pb en medio conteniendo Cd y Pb medido por absorción atómica en Totora e Ichu, analizados en Tallos.

MUESTRAS Cd/Pb (Pb)				
TALLO				
CC (ppm)	TOTORA (ppm)	%	ICHU (ppm)	%
20	0.1178	0.589	0.0089	0.045
50	0.4296	0.859	0.0041	0.008
80	1.0885	1.361	0.0276	0.035

Tabla N°24: Porcentaje de retención de Pb en medio conteniendo Cd y Pb medido por absorción atómica en Totora e Ichu, analizados en Raíces.

MUESTRAS Cd/Pb (Pb)				
RAIZ				
CC (ppm)	TOTORA (ppm)	%	ICHU (ppm)	%
20	0.0024	0.012	0.0121	0.061
50	0.3611	0.722	0.0060	0.012
80	1.6898	2.112	0.0825	0.103

Figura N°12: Porcentaje de Retención de Pb en medio conteniendo Cd y Pb en tallos y raíces de Totorá.

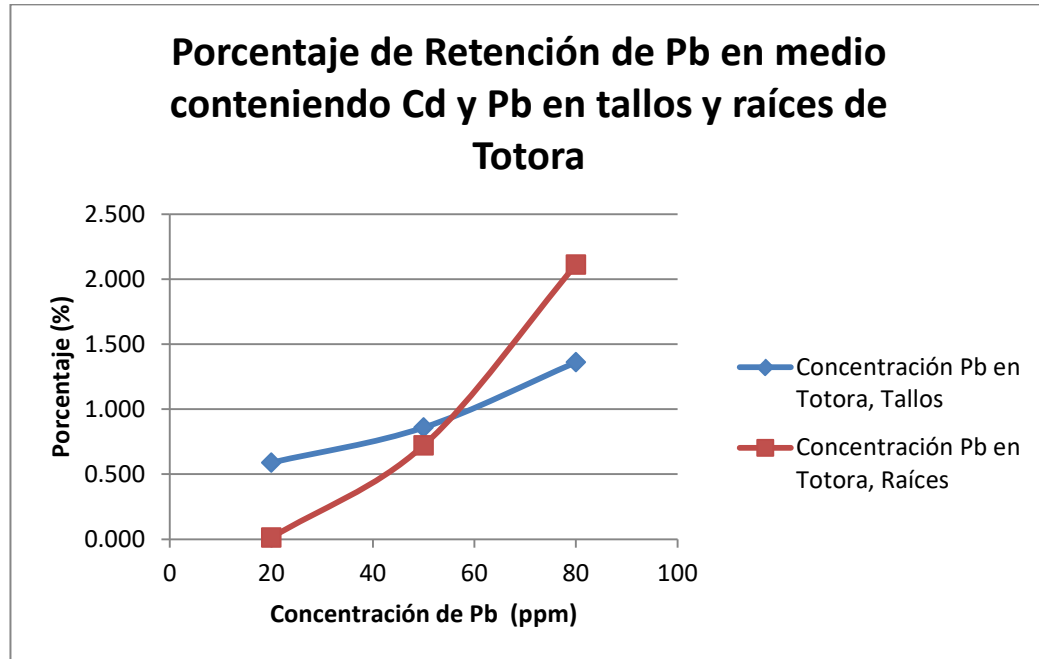


Figura N°13: Porcentaje de Retención de Pb en medio conteniendo Cd y Pb en tallos y raíces de Ichu.

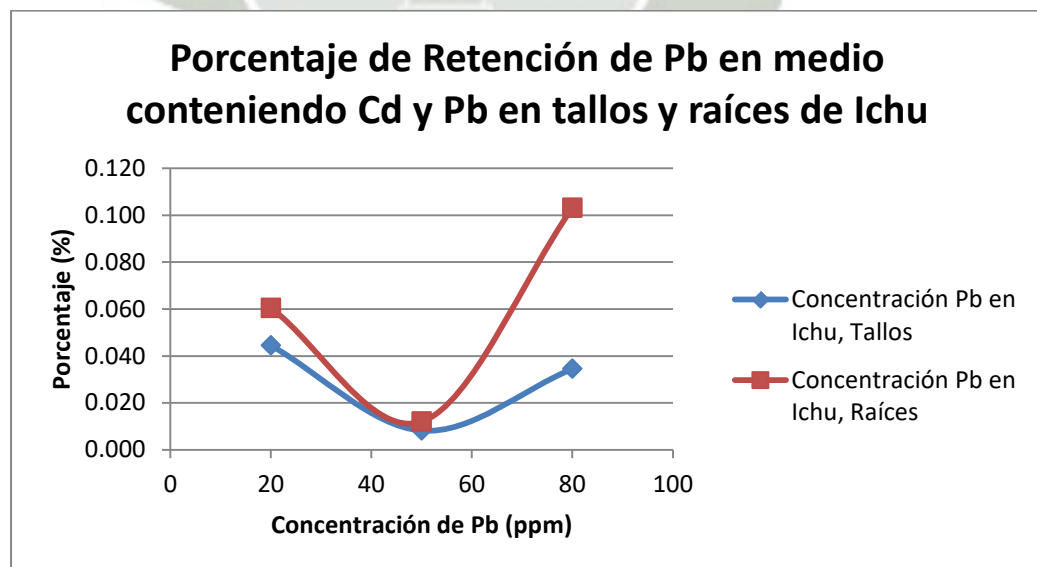


Tabla N°25: Porcentaje de retención de Cd en medio conteniendo Cd y Pb medido por absorción atómica en Tatora e Ichu, analizados en Tallos.

MUESTRAS Cd/Pb (Cd)				
TALLO				
CC (ppm)	TOTORA (ppm)	%	ICHU (ppm)	%
20	0.1531	0.766	0.0103	0.052
50	0.0174	0.035	0.0016	0.003
80	0.0040	0.005	0.0098	0.012

Tabla N°26: Porcentaje de retención de Cd en medio conteniendo Cd y Pb medido por absorción atómica en Tatora e Ichu, analizados en Raíces.

MUESTRAS Cd/Pb (Cd)				
RAIZ				
CC (ppm)	TOTORA (ppm)	%	ICHU (ppm)	%
20	0.1802	0.901	0.0164	0.082
50	0.0215	0.043	0.0035	0.007
80	0.0091	0.011	0.0102	0.013

Figura N°14: Porcentaje de Retención de Cd en medio conteniendo Cd y Pb en tallos y raíces de Totora.

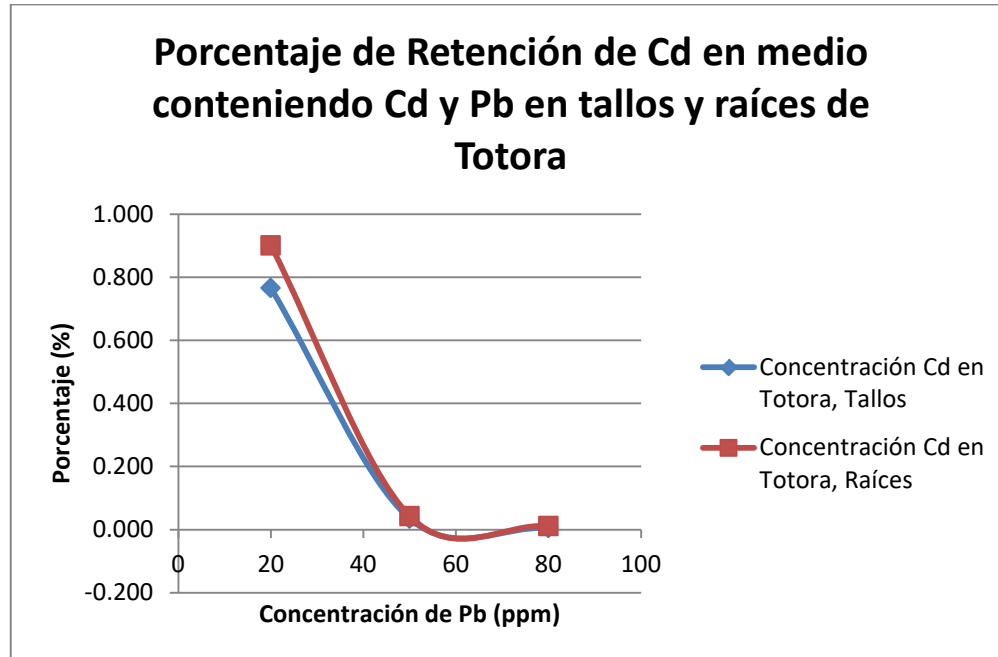


Figura N°15: Porcentaje de Retención de Cd en medio conteniendo Cd y Pb en tallos y raíces de Ichu.

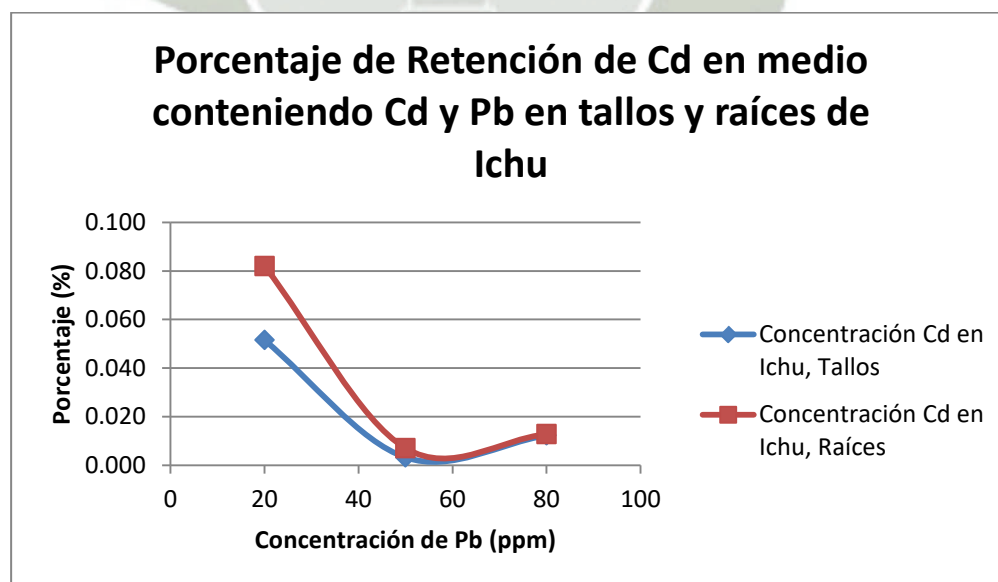


Tabla N°27: Porcentaje de retención de metales pesados agrupados por planta evaluada, Totorá.

TOTORA						
MUESTRA	CC	PORCENTAJE		%	TOTAL	
		RAICES	TALLOS	TOTAL	ABS.	
				ABS.	ppm	
Pb	20	3.475	2.449	5.924	1.185	
	50	0.677	0.992	1.669	0.834	
	80	0.876	0.840	1.717	1.374	
Cd	20	0.082	0.119	0.200	0.040	
	50	0.018	0.006	0.024	0.012	
	80	0.039	0.025	0.064	0.051	
Pb/Cd	Pb	20	0.012	0.589	0.601	0.120
		50	0.722	0.859	1.581	0.791
		80	2.112	1.361	3.473	2.778
Pb/Cd	Cd	20	0.901	0.766	1.667	0.334
		50	0.043	0.035	0.078	0.039
		80	0.011	0.005	0.016	0.012

Tabla N°28: Porcentaje de retención de metales pesados agrupados por planta evaluada, Ichu.

ICHU						
MUESTRA	CC	PORCENTAJE		%	TOTAL	
		RAICES	TALLOS	TOTAL ABS.	ABS. ppm	
Pb	20	0.099	0.062	0.160	0.032	
	50	0.034	0.048	0.081	0.040	
	80	0.014	0.011	0.025	0.020	
Cd	20	0.296	0.165	0.461	0.092	
	50	0.054	0.029	0.083	0.041	
	80	0.032	0.030	0.063	0.050	
Pb/Cd	Pb	20	0.061	0.045	0.105	0.021
		50	0.012	0.008	0.020	0.010
		80	0.103	0.035	0.138	0.110
Pb/Cd	Cd	20	0.082	0.052	0.134	0.027
		50	0.007	0.003	0.010	0.005
		80	0.013	0.012	0.025	0.020

3.5.2 Discusión.

Eficaz proceso de Retención de Pb y Cd en Totorá e Ichu

- Se puede afirmar que el proceso de acumulación de Pb en Totorá fue un proceso eficaz, el mayor porcentaje total de absorción fue de 5.924% equivalente a 1.185 ppm de Pb presente en la planta, acumulando 3.47 % (0.694 ppm) en raíces y

2.44% (0.488 ppm) en tallos a una concentración de 20 ppm, se observó además que la retención se llevó a cabo en mayor proporción en las raíces de las plantas de totora, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en estudios de inmovilización de Cu en sistemas wetland en brotes y raíces de totora llegando a absorber 0.6 y 1.9 % respectivamente de cobre que ingresa a su sistema.²³

- El proceso de acumulación de Pb no generó cambios severos en el color, grosor y crecimiento de las plantas, salvo en el ápice y margen de las hojas que desarrollaron una coloración amarillenta (ANEXO N°8 Registro fotográfico del experimento, plantas de totora).
- Estudios realizados por Beltran, 2001 en la tesis de “Fitoextracción en Suelos Contaminados con Cadmio y Zinc Usando Especies Vegetales Comestibles”, el Cd es considerado un elemento tóxico para la planta ya que causa disturbios en las actividades enzimáticas, inhibe la formación de antocianina y clorofila. Los síntomas son retardo en el crecimiento, daño en raíces, clorosis de las hojas y coloración café-rojiza en los bordes de las hojas. La clorosis en las hojas se atribuye a la reducción en el número de cloroplastos por célula y a los cambios en el tamaño de la célula pues el cadmio interfiere en la duplicación de cloroplastos, en la división celular y altera las propiedades del aparato fotosintético.²⁶
- El proceso de acumulación de Cd en Totora presentó un bajo porcentaje de eficacia en la muestra sola con Cd, el mayor porcentaje total de absorción se dio a una concentración de 20 ppm acumulando 0.2 % equivalente a 0.04 ppm en toda la planta, 0.08 % (0.016 ppm) en las raíces y 0.11 % (0.022 ppm) en tallos lo cual nos podría estar indicando que la presencia de este metal a concentraciones mayores a 20 ppm podría estar promoviendo la acción de las proteínas de transporte de membrana de manera que el metal es pobremente acumulado en las plantas bajo las condiciones dadas.
- Existe evidencia de buen porcentaje de acumulación de Cd a bajas concentraciones, en estudios realizados se encontró que las raíces de totora (*S. californicus*) con concentraciones de 1.5 y 2.0 ppm de Cd acumularon mayor

cantidad de este elemento, con cambios severos en el color, engrosamiento y crecimiento longitudinal²⁴, resultados similares fueron evidenciados en los experimentos con las plantas que fueron expuestas a dicho metal (ANEXO N° 8 Registro fotográfico del experimento, plantas de totora, tratamientos con Cd).

- La Totora es la especie que mejores características presentó para la acumulación de Pb, especialmente en la concentración de 20ppm en la muestra de Pb reteniendo hasta un 5.9% (1.185ppm) y presentando una acumulación de Cd en la muestra de Pb/Cd 20ppm de 1.667% (0.334ppm) mayor que en la muestra con Cd solo en la misma concentración de 20ppm 0.2% (0.04ppm) siendo favorecido por la presencia de Pb en el medio, esto podría deberse a que al estimular el plomo la acción de las proteínas de transporte de la membrana celular de las plantas el Cd por tener carga iónica similar aprovecharía ésta acción generada por el Pb e ingresaría a la planta por medio de estos canales de transporte, según explica Lasat, 2001 en el uso de plantas para la remoción de metales pesados de suelos contaminados, el mecanismo de acumulación de Cd no ha sido dilucidado, es posible que la toma de este metal en las raíces sea vía un sistema envuelto en el transporte de otro micronutriente esencial divalente, posiblemente Zn^{2+} , el Cd es un químico análogo y las plantas podrían no ser capaces de diferenciar entre estos dos iones.²⁵
- El Pb también se vio favorecido por la presencia de Cd mostrando una retención de 3.473% (2.778ppm) en la muestra de Pb/Cd (Pb) a una concentración de 80ppm que fue maor que la muestra de Cd solo, a una concentración de 80ppm con 1.717% (1.374ppm).
- Chaney *et al.*, 1999 La acumulación de Zn y Cd en pruebas de campo, en diferentes especies, muestra una variación sustancial en la hiperacumulación de Cd en presencia de Cantidades de Zn en relación de 1g de Cd: 100g de Zn, todas las cepas acumularon altos niveles de Zn pero difirieron en la hiperacumulación del Cd.²⁶
- Según Fernández *et al.*,2013 “La totora no solamente acumula contaminantes cuando está viva, sino que se ha verificado que los tejidos de ejemplares secos

pueden ser altamente eficientes en la retención de metales, actuando como resinas de intercambio. Esto se puede interpretar como que la utilización de biomasa seca sería una importante ventaja para el manejo de humedales construidos, porque las macrófitas podrían ser cosechadas, secadas y como disposición final, utilizadas en columnas para la eliminación de metales pesados en agua, debido a que cuando mueren, su degradación es lenta, pero siguen reteniendo metales dentro del humedal.”⁴⁴

- Se puede decir que el proceso de acumulación de Pb y Cd en Ichu fue poco eficiente generando porcentajes de acumulación bajos, el mayor porcentaje total de absorción fue de 0.16 % (0.032 ppm) acumulando 0.09 % (0.018 ppm) en raíces y 0.06 % (0.012 ppm) en tallos a una concentración de 20 ppm, esto se podría deber a que la planta por ser originaria de suelos áridos y con poco contenido de nutrientes sufrió un desgaste metabólico al tratar de adaptarse al sistema hidropónico, no pudiendo acumular iones metálicos en sus raíces ni tallos.
- La concentración de Cd a 20ppm registró 0.461% (0.092ppm). La concentración a la cual fueron llevados los experimentos podría ser excesiva tomando en cuenta el gasto energético y metabólico que tuvo que efectuar la planta para poder adaptarse al sistema hidropónico, en los registros fotográficos (ANEXO N°9 Registro fotográfico del experimento en plantas de Ichu.) se pudo observar que las plantas de Ichu no se desarrollaron con normalidad evidenciando una decoloración fuerte en sus hojas y raíces.

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES.

- La exposición de los metales pesados a las plantas, tanto de Ichu como Totora, provocó deterioro en sus tallos y raíces, éstas sufrieron un deterioro progresivo con el tiempo de exposición a los metales, siendo el Cd el metal que mayor daño provocó en ambas plantas ocasionando principalmente marchitamiento y pérdida de turgencia en las plantas de Totora y decoloración de las raíces en las plantas de Ichu.
- De acuerdo a la concentración de Pb y Cd en las raíces y tallos de las plantas en estudio se obtuvo una mejor absorción en las raíces.
- De las plantas evaluadas la totora presentó características de buen crecimiento y es potencialmente aceptable para la acumulación de metales pesados, redujo la concentración presente en el medio de cultivo hidropónico; por otra parte el Ichu no presentó características de buen crecimiento en el medio de cultivo hidropónico y presenta muy baja acumulación de metales pesados.

CAPITULO V: RECOMENDACIONES.

5.1 Sobre la recolección de material biológico.

- Se recomienda recoger plantas jóvenes y del mismo tamaño para poder observar el crecimiento regular entre ellas.
- Deben ser recolectadas de una misma zona para evitar diferencias en el material biológico sobre composición de la planta, del suelo y adaptación al medio.

5.2 Sobre la construcción del invernadero.

- Se debe tomar en cuenta al momento de la instalación, las condiciones climáticas para evitar contaminaciones o pérdida de las plantas. De ser un sitio abierto el viento podría dañar el material biológico o contaminar el medio.
- Se debe regular el suministro de oxígeno al medio de cultivo para evitar la descomposición de las raíces.

5.3 Sobre la preparación de los medios.

Tener en cuenta el tipo de planta y las características de esta para poder utilizar las concentraciones adecuadas de acuerdo a su requerimiento. En el caso de la Totora, requiere un medio rico en nutrientes según su tipo de hábitat, caso contrario al Ichu que, al estar en condiciones extremas requiere una concentración menor de nutrientes.

5.4 Sobre el Comportamiento de las plantas.

- Se recomienda realizar investigación de absorción de metales pesados en suelo para las plantas de Ichu ya que presentaron problemas de adaptación en medio hidropónico.

- El Ichu, al ser una planta que habita en zonas que presentan condiciones extremas, requiere concentración baja de nutrientes.

5.5 Sobre los Resultados.

- Para poder aplicar un mejor diseño experimental es recomendable hacer un mayor número de repeticiones de cada una de las muestras.
- Si se desea utilizar plantas para remediación se recomienda no utilizar plantas de pastoreo como el *Stipa ichu* (Ichu) ya que podrían ser consumidas por animales de la zona.



REFERENCIAS

1. Juárez H. 2012. Contaminación del Río Rímac por Metales Pesados y Efecto en la Agricultura en el Cono Este de Lima Metropolitana. Lima – Peru. Pp. 12-14, 46,49.
2. Galan H., E; Romero B., A. 2008. Contaminación de Suelos por Metales Pesados. Conferencia. Universidad de Sevilla – España. Pp.49.
3. Acosta de Armas M.M.; Montilla P., J. X. 2011. Evaluación de la contaminación por Cadmio y Plomo en Agua, suelo, y Sedimento y Análisis de los Impactos Ambientales en la Subcuenca del río Balsillas Afluente del río Bogotá. Universidad la Salle, Facultad de Ingeniería, Bogotá D.C. Colombia. Pp. 23-24.
4. Rodríguez O., J. C.; Valdez C., R. D.; Lara M., J. L.; Rodríguez F., H.; Vázquez A., R.E.; Magallanes Q., R.; García H., J. L. 2006. Soil nitrogen fertilization effects on phytoextraction of Cd and Pb by tobacco (*Nicotiana tabacum L.*). *Bioremediation Journal* 10(3). Pp. 105-114.
5. Puga, S.; Sosa, M.; Lebgue, T.; Quintana, C.; Campos, A. 2006. Contaminación por metales pesados en el suelo provocado por la industria minera. Curso: *Ecología Aplicada* 5(1-2). Universidad Agraria La Molina. Lima - Perú. Pp.149-155.
6. Rodríguez P. J. 2005. Contaminación Minera: Tecnología Letal para Extraer Metales de Baja Ley.
<http://www.ecoportal.net/content/view/full/45151>
7. Navarro, A.; Carmona, J.M.; Font, X. 1996. Contaminación de Suelos y Aguas Subterráneas por Vertidos Industriales. *Acta Geológica Hispana*, V30. España. Pp. 50.
8. Abarca M, S.; Mora B., B. 2007. Contaminación del Agua. *Revista Biocenosis/Vol 20* (1-2). Costa Rica. Pp. 137-139.
9. Garzón, A.M. 2006. Revisión Científica de Plomo y Cadmio. Ministerio del Medio Ambiente. Republica de Ecuador.

10. Ortiz, H. G.; Trejo C., J. C.; Valdez C., R. D.; Arreola A., J. G.; Flores H., A.; López A., B. 2009. Fitoextracción de Plomo y Cadmio en suelos contaminados usando Quilete (*Amaranthus hybridus L.*) y Micorrizas. Revista Chapingo, Serie Horticultura. México.
11. Rondan L.E. 2006. Presencia de Metales Pesados en la Biota acuática (*Orestias sp* y *Schoenoplecus tatora*) de la Desembocadura del Ría Ramis – Lago Titacaca. Universidad Nacional del Altiplano. Puno.
<http://www.monografias.com/trabajos55/metales-pesados-en-titicaca/metales-pesados-en-titicaca2.shtml>
12. Higuera P. y R. Oyarsun. Curso de Minería y Medio Ambiente.
<http://www.uclm.es/users/higuera/mam/MMAM5.htm>
13. Coordinadora del Programa Nacional de Sanidad Acuicola. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Xochimilco.
<http://www.xoc.uam.mx/pronalsa/tabla3.pdf>
14. Delgadillo L., A. E.; González R., C. A.; Prieto G., F.; Villagomez I, J. R.; Acevedo S, O. 2011. Fitorremediación: Una Alternativa para Eliminar la Contaminación. Tropical and Subtropical Agroecosystems 14. México. Pp. 587-612.
15. Prieto, J.; Gonzales, C.; Roman G., A. D.; Prieto, F. 2009. Contaminación y Fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. Centro de Investigaciones Químicas. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Hidalgo, México.
16. Villagrana R. S. 2006. Fitorremediación de un Suelo Contaminado con Plomo por Actividad Industrial. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, Mexico.
<http://www.monografias.com/trabajos-pdf/fitorremediacion/fitorremediacion.pdf>
17. Ochoa F.D. 2008. Optimización del Proceso de Secado Solar para lodos Residuales y cuantificación de metales Pesados. Universidad Autónoma de ciudad Juarez, Instituto de Ciencias Biomédicas, Programa de Química, México.

<http://www.uacj.mx/ICB/RedCIB/publicaciones/Tesis%20Licenciatura/Documentos/Qu%20ADmica/Optimizaci%20del%20proceso%20de%20secado%20solar%20para%20lodos%20residuales%20y%20cuantificaci%20de%20metales%20pesados.pdf>

18. J.G., Alonso J.; Pastor J., Sastre-Conde, Lobo M.C. 2004. Absorción y Acumulación de Metales Pesados en Tres Especies Vegetales en Suelos Enmendados con Lodos de Depuradora. Environmental Biotechnology and Engineering. Madrid – España.
19. Delgadillo O., Camacho A., Pérez L.F., Andrade M. 2010. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua. Universidad Mayor de San Simón. Facultad de Agronomía. Cochabamba, Bolivia.
20. PELT – ADESU. 2001. Técnicas de Reimplante de totora. Programa de Capacitación Sobre el Manejo de la Totora. Proyecto 21.03. Perú.
21. Arze, C. 1984. Comportamiento de totora frente a contaminaciones inorgánicas. Informe inédito, UNESCO. Uso de Totorales para la descontaminación en Bolivia, La Paz. Laboratorio del Instituto de Química, Cota-Cota. Calle 27. La Paz, Bolivia. Pp.87.
22. Mayta, Huiza F. 2014. Cultivo y Manejo de Pastos, Universidad Jose Carlos Mariategui. Facultad de Ingeniería Agronómica. Moquegua, Perú. Pp.60.
23. Bathia M. et al. 2013. Analyzing Remediation Potential of Wastewater through Wetland Plants: A Review. Table N°2. Department of biotechnology, Thapar University. Punjab, India. Pp.3.
24. Fernández A. L. *et al.* 2013. Capacidad acumuladora de Cd en raíces de *Scirpus californicus* expuestas a diferentes concentraciones de Nitrato de cadmio en condiciones de laboratorio. Revista Científica de Estudiantes Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo, Perú. Pp. 4.
25. Mitch, M.L. 2001. The Use of plants for the removal of toxic metals from contaminated soil. American Association for the advancement of Science. Environmental Science and Engineering Fellow. U.S.A. Pp. 10.

26. Beltran V., M. 2001. Fitoextracción en Suelos Contaminados con Cadmio y Zinc Usando Especies Vegetales Comestibles. Universidad Autónoma Metropolitana. División de Ciencias Básicas e Ingenierías. Mexico. D.F. Pp. 48 – 100.
27. Figueroa C., M. 2004. Determinación de metales trazas (Ni, Pb, Cr, Cu y As) en *Scirpus californicus*. Tesis, Escuela de Química y Farmacia. Universidad Austral de Chile. Valdivia – Chile. Pp. 5.
28. Instituto Nacional de Biodiversidad. 2008, Protocolo de Manejo de Colecciones de Plantas Vasculares, Proyecto: “Desarrollando Capacidades Compartiendo Tecnología para la Gestión de la Biodiversidad en Centroamérica”.
http://www.inbio.ac.cr/web_herbarios/web/pdf/protocolo-vasculares.pdf
29. Guzmán, D. 2004. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Sistema Unificado de Información Institucional. Hidroponía en casa: Una actividad familiar. San José, Costa Rica.
http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/Hidroponia.pdf
30. Rodríguez D., Alfredo *et al* .Red Hidroponía, Boletín Informativo N12, Julio/agosto 2001, Universidad Agraria la Molina. Departamento de Biología. Centro de Investigación de Hidroponía y Nutrición Mineral.
<http://www.lamolina.edu.pe/hidroponia/boletin12.htm#Artículos Científicos>
31. Universidad Nacional Agraria La Molina, Centro de Investigación de Hidroponía y Nutrición Mineral, Solución Hidropónica La Molina.
<http://www.lamolina.edu.pe/hidroponia/solucion1.htm>
32. Sanchez-Gonzales L., Arturo. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. Técnicas de Recolecta de Plantas y Herborización.
<http://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/6082/Capitulo12.pdf>
33. Fernandez N., M. A. Universidad Politécnica de Cartagena, Colombia. Efecto de diferentes niveles de aireación de la solución nutritiva sobre el crecimiento y la calidad de canónigos y berros cultivados en bandejas flotantes.
<http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/3130/1/pfc5030.pdf>

34. Gilzans, J.C. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Uruguay.
HIDROPONÍA.
<http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/11788121007155745.pdf>
35. Álvarez M. A., C. Buendía Ibars y C. García Cantón. Plantas Transgénicas y Fitorremediación.
36. A. Singh, S. Eapen and M.H.Fulekar. Potential of Medicago sativa for uptake of cadmium from contaminated environment. Environmental Biotechnology Laboratory, Professor in Environmental Biotechnology. Department of Life Sciences, University of Mumbai, Nuclear Agriculture Biotechnology Division.
37. Merli A., Gregoire C., Elsaesser D., Huguenot D., Lange H., Lebeau T. 2008. Mitigation of agricultural nonpoint-source pesticide pollution in artificial wetland ecosystems. Springer-Verlag 2008
http://mascive.ustrasbg.fr/depotcel/DepotCel/592/publications_articles/springer_review.pdf
38. Moya S., Hernández S. 2012. Fitotoxicidad del Cadmio (Cd) y el Mercurio (Hg) en la especie Brassica Nigra. Universidad De Medellín, Colombia. p.14, p.25
39. Ramírez L., Pérez M., Jiménez P., Hurtado H., Gómez E. 2011. Evaluación preliminar de sistemas acuapónicos e hidropónicos en cama flotante para el cultivo de orégano. (Origanum vulgare: Lamiaceae). Universidad Militar Nueva Granada, España.p.1
40. López S.; Melaj M.; Tomellini G. y Martin O. Rizofiltración en el tratamiento de aguas contaminadas con Uranio. Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, Argentina. p.2
<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/argentina14/rizofil.pdf>
41. Dalguerre A. 2012. Evaluación del Sistema de Tratamiento de Aguas Grises en el A.H. Villa Alborada, Nueva Rinconada de Pamplona Alta, San Juan de Miraflores. Universidad Agraria La Molina. p.28
http://www.lamolina.edu.pe/proyectos/proyecto_AQUAtech/Diplomado_III/monografias/pdf_doc/Dalguerre_Lamas.pdf

42. Hernandez D.; Ramos N.; Castillo J.; Orduña J. 2015. Evaluación de la eficiencia de humedales artificiales de flujo sub-superficial utilizando *Stipa ichu* para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Universidad Santiago de Cali, Colombia. p47-59
43. Jaramillo M.; Flores E. 2012. “Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales *Lemna minor* (Lenteja de agua) y *Eichornia crassipes* (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera”. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. p36
44. Fernández A.L.2013. “Capacidad acumuladora de Cadmio en raíces de *Scirpus californicus* expuesta a diferentes concentraciones de nitrato de cadmio en condiciones de laboratorio”. Universidad Nacional de Trujillo, Facultad de Ciencias Biológicas, Trujillo, Perú. p6
45. Martínez Y.; Balda R. 2011. “Visión general sobre el proceso de fitorremediación en lodos provenientes de Ptar”. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. p127.
46. Cuadrado W.; Vicuña C.; Camargo E. 2015. Evaluación de la planta *Scirpus californicus* (Totorá) en la eficiencia de remoción de plomo en un prototipo de Humedal Construido de Flujo Superficial. Universidad Nacional de Centro del Perú. p48.
47. Vidal M. 2009. “Evaluación de los mecanismos de adsorción y acumulación intracelular de plomo (Pb²⁺), en sistemas continuos de fitorremediación con *Salvinia minima*”. Instituto de Ecología. Xalapa, Veracruz, México. p11.
48. Jerez J.A. 2013. “Remoción de metales pesados en lixiviados mediante fitorremediación”. Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad de Costa Rica. p17.
49. Peláez M.; Casierra P.F.; Torres G. 2014. “Toxicidad de Cadmio y Plomo en Pasto Tanner (*Brachiaria arrecta*)”. Revista de ciencias Agrícolas. p9.
50. Couselo J.L.; Corredoira E. 2007. “Respuesta de plantas de álamo a elevadas concentraciones de plomo”. Instituto de investigaciones Agrobiológicas de Galicia, Santiago de Compostela, España. p35.

51. De Lange P.; Gardner R.; Champion P.; Tanner C. 1998. "Schoenocleptus californicus (Cyperaceae) in New Zealand". Diario de Botánica de Nueva Zelanda, Nueva Zelanda. p320-321.
52. Roque B.; Echevarría M.; Gomez C. 2003. "Determinación de la producción forrajera y valor nutricional de totora (*Scirpus totora*, Kunth) en vacunos". Anales Científicos de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima-Perú. p223.
53. Charca S.; Noel J.; Andia D.; Flores J.; Guzman A.; Renteros C.; Tumialan J. 2015. "Assessment of Ichu Fibers as Non-Expensive Thermal Insulation System for the Andean Regions". Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC), Lima- Perú.p1-2.
54. Kastori R.; Petrovic M.; Petrovic N. 2008. "Effect of excess lead, cadmium, copper, and zinc on water relations in sunflower". Facultad de Agricultura, Instituto de Campo y Cultivos Vegetales. Universidad de Novi Sad, Yugoslavia. p2427-2439.
55. Rubio C.; Gutiérrez A.J.; Martín-Izquierdo R.E.; Revert C.; Lozano G. y Hardisson A. 2004. "El plomo como contaminante alimentario". Facultad de Medicina. Universidad de La Laguna. España.
56. Hess A. A. 2004. "El Plomo en la construcción". Instituto de Estabilidad, Facultad de ingeniería. Universidad Nacional del NordEste. Argentina.

ANEXOS

ANEXO N°1 Proceso de recolección de plantas de Ichu.

Figura N°16: Zona de Recolección La Oroya.



Figura N°17: Zona de Recolección La Oroya.



Figura N°18 Procedimiento de Recolección de Plantas de Ichu.



Figura N°19 Procedimiento de Recolección de Plantas de Ichu.



Figura N° 20 Retiro de Planta de Ichu de su Medio Natural.



Figura N°21 Bandejas con Muestras de Ichu Recolectadas.



ANEXO N°2 Proceso de Recolección Plantas de Totora

Figura N° 22 Zona de Recolección de plantas de Totora. Zona cercana a Pantanos de Villa.



Figura N° 23 Zona de Recolección de plantas de Totora. Zona cercana a Pantanos de Villa.



Figura N° 24 Selección de Plantas Jóvenes de Totora.



Figura N° 25 Selección de Plantas Jóvenes de Totora



ANEXO N°3 Instalación y acondicionamiento de un Invernadero para el desarrollo del sistema hidropónico.

Figura N° 26 Colocación de Malla Ratschel.



Para evitar corrientes de viento que afecten los cultivos hidropónicos

Figura N° 27 Esquinas superiores del invernadero, reforzadas con Nylon y atados a la malla.



Figura N° 28 Colocación del Suelo Plastificado.



Para evitar contacto directo con el suelo y disminuir las posibilidades de contaminación de los cultivos hidropónicos.

Figura N° 29 Invernadero Listo para la Instalación de los Sistemas Hidropónicos.



ANEXO N°4 Preparación del medio de cultivo Hidropónico.

Figura N° 30 Soluciones Patrón A y B.



Figura N° 31 Preparación de Medio de Cultivo con Soluciones Patrón .



Figura N°32 Preparación de Medio de Cultivo con Soluciones Patrón .



Figura N°33 Preparación de Medio de Cultivo. Mezclando Soluciones Patrón.



Figura N° 34 Lavado de Bandejas.



Figura N° 35 Medio de Cultivo antes de Repartir por Bandejas.



Figura N° 36 Bandeja con Medio de Cultivo.

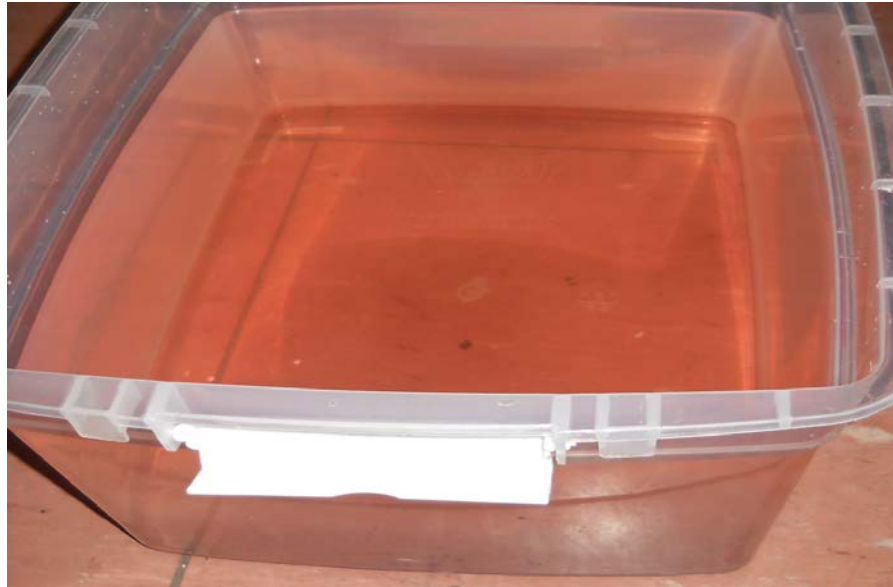


Figura N° 37 Bandejas con Medio de Cultivo, Tapada para Evitar Contaminantes.



ANEXO N°5 Prueba de adaptabilidad de plantas de Ichu a Sistema Hidropónico.

Figura N° 38 Bandejas con Diferentes Concentraciones de Medio de Cultivo Hidropónico.



Bandeja Izquierda. A un cuarto de la concentración de nutrientes según las especificaciones del fabricante (UNALM).

Bandeja Derecha. A media concentración de nutrientes según las especificaciones del fabricante (UNALM).

Figura N° 39 Tubos de Oxigenación de las Bandejas



Conectados a un motor, suministrando oxígeno.

Figura N° 40. Bandejas Cubiertas con Cartulina Negra



ANEXO N°6 Comparación de plantas de Ichu mantenidas en tierra suelta y colocadas en el Sistema Hidropónico.

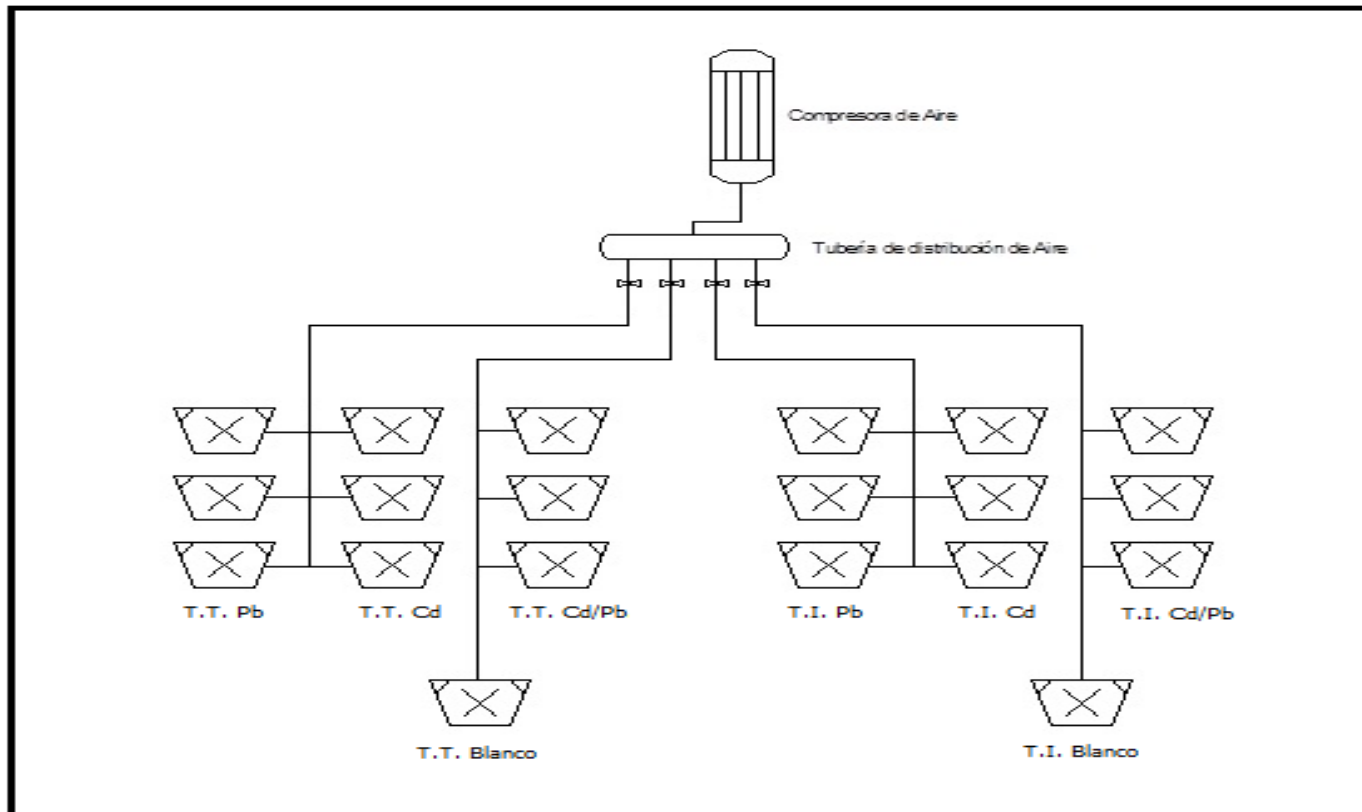
Figura N° 41 Primera Semana de Aclimatación



Figura N°42 Segunda Semana de Aclimatación.



ANEXO N°7 Esquema del Sistema Hidropónico.



Armado del sistema y distribución de bandejas para llevar a cabo los tratamientos.

ANEXO N°8 Registro fotográfico del Experimento en Plantas de Totora.

Evolución de las plantas con los diferentes tratamientos.

Figura N° 43 Tratamiento a 20 ppm de Pb











TOTORA 0,02 Pb	26/01	02/02	09/02	16/02	01/03
Hojas y Tallos					
Raíces					

Figura N° 44 Tratamiento a 50 ppm de Pb

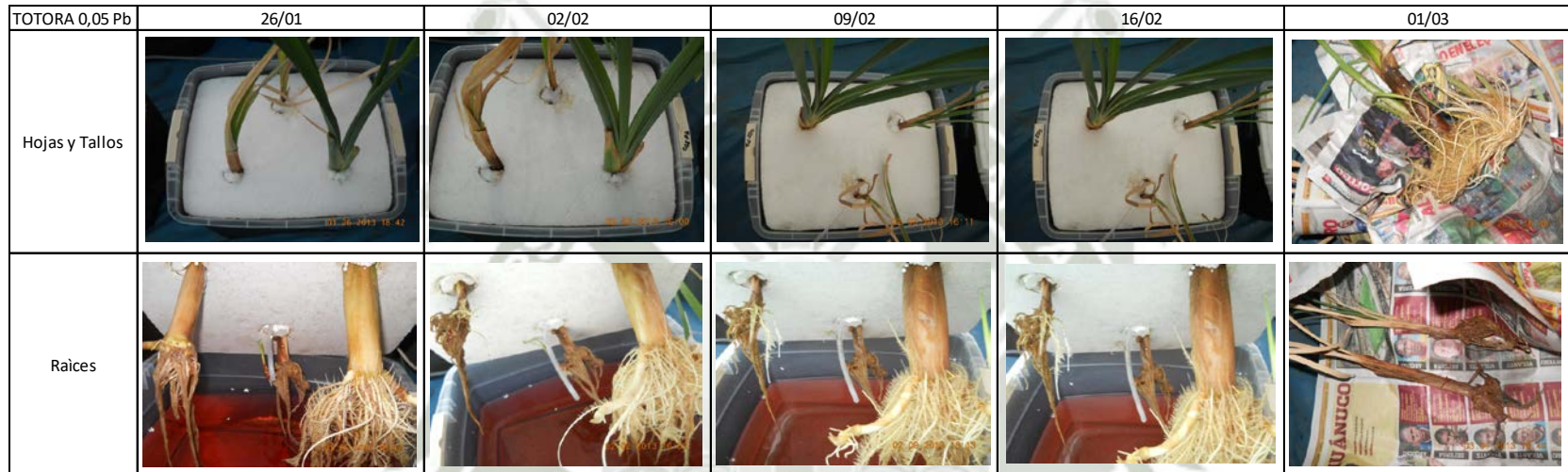


Figura N° 45 Tratamiento a 80 ppm de Pb

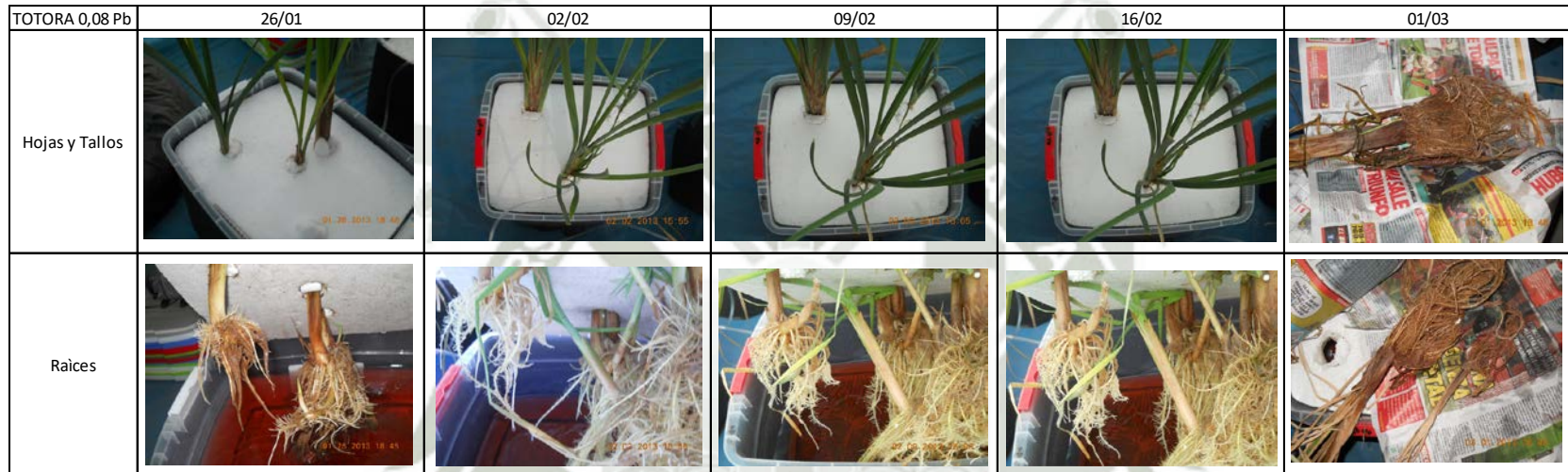


Figura N°46 Tratamiento a 20 ppm de Cd



Figura N 47 Tratamiento a 50 ppm de Cd


TOTORA 0,05 Cd	26/01	02/02	09/02	16/02	01/03
Hojas y Tallos					
Raíces					

Figura N° 48 Tratamiento a 80 ppm de Cd

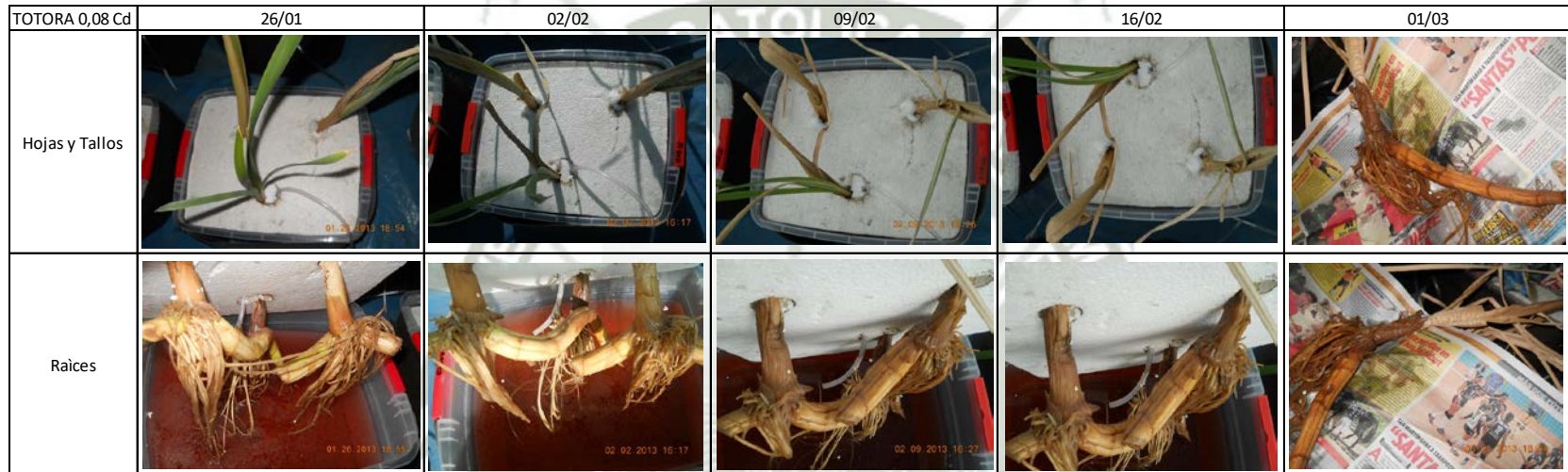


Figura N° 49 Tratamiento a 20 ppm de Pb y Cd



Figura N° 50 Tratamiento a 50 ppm de Pb y Cd











TOTORA 0,05 Cd/Pb	26/01	02/02	09/02	16/02	01/03
Hojas y Tallos					
Raíces					

Figura N° 51 Tratamiento a 80 ppm de Pb y Cd




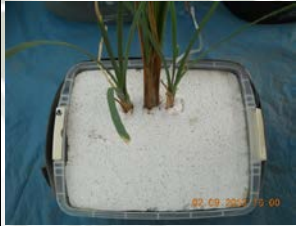
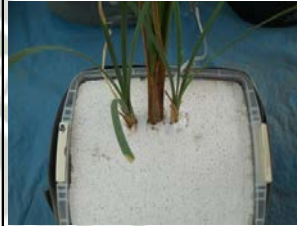






TOTORA 0,08 Cd/Pb	26/01	02/02	09/02	16/02	01/03
Hojas y Tallos					
Raíces					

Figura N° 52 Blanco

TOTORA - BLANCO	26/01	02/02	09/02	16/02	01/03
Hojas y Tallos					
Raíces					

ANEXO N°9 Registro fotográfico del Experimento en Plantas de Ichu.

Evolución de las plantas con los diferentes tratamientos.

Figura N° 53 Tratamiento a 20 ppm de Pb



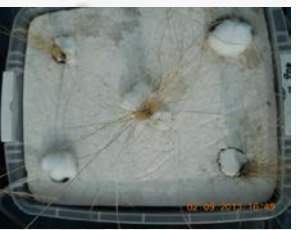







ICHU 0,02 Pb	26/01	02/02	09/02	16/02	01/03
Hojas y Tallos					
Raíces					

Figura N° 54 Tratamiento a 50 ppm de Pb

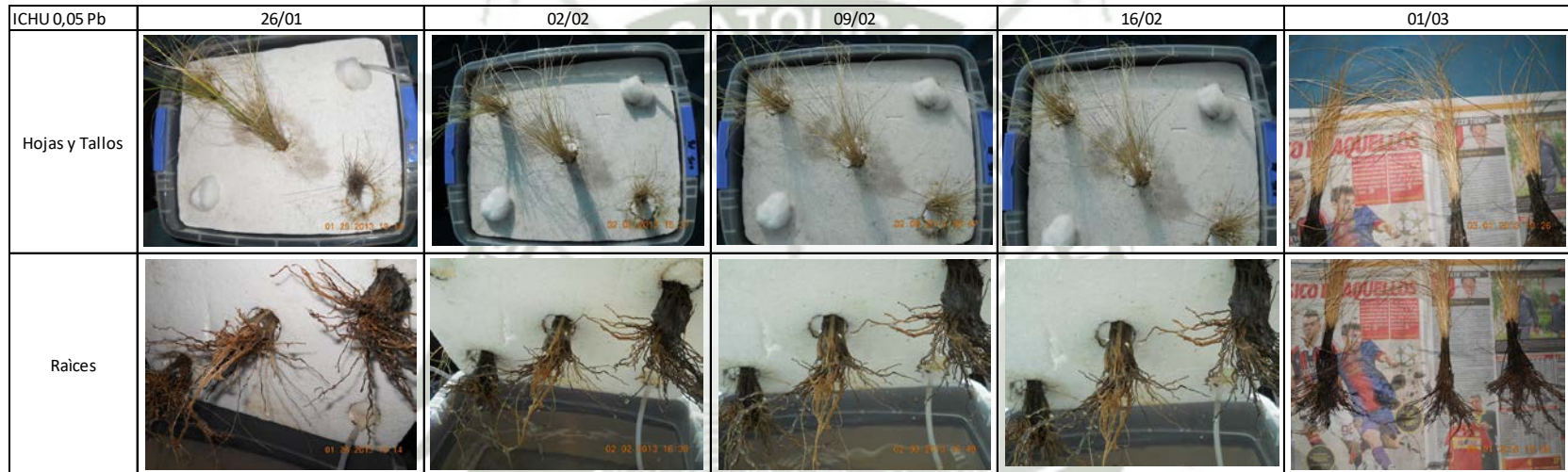


Figura N° 55 Tratamiento a 80 ppm de Pb

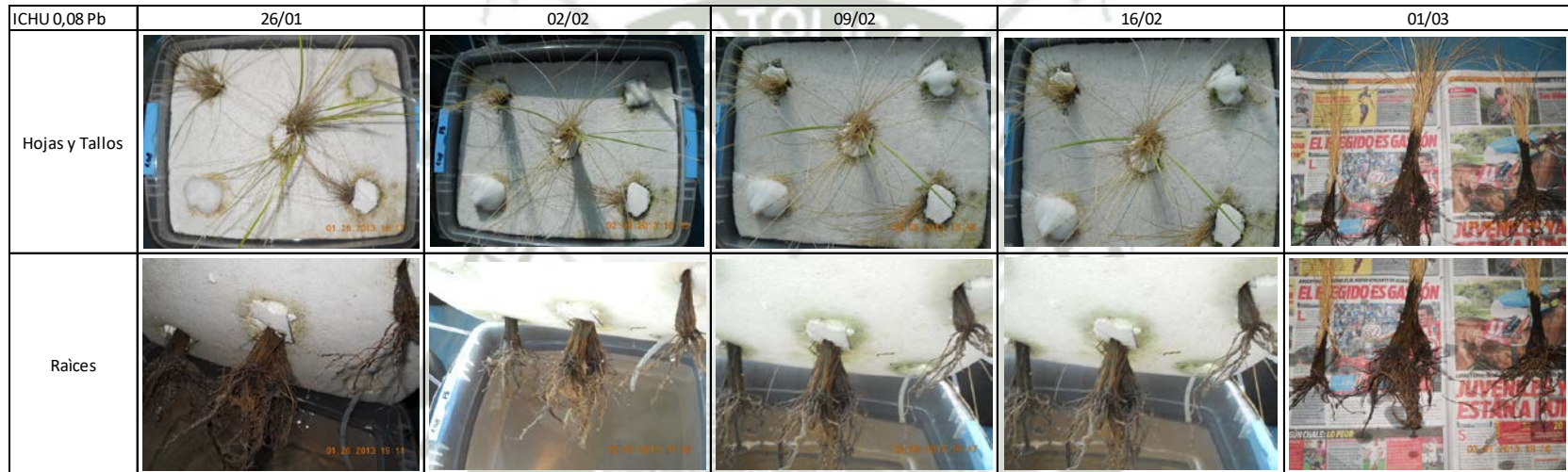


Figura N° 56 Tratamiento a 20 ppm de Cd



Figura N° 57 Tratamiento a 50 ppm de Cd











ICHU0,05 Cd	26/01	02/02	09/02	16/02	01/03
Hojas y Tallos					
Raíces					

Figura N° 58 Tratamiento a 80 ppm de Cd



Figura N° 59 Tratamiento a 20 ppm de Pb y Cd

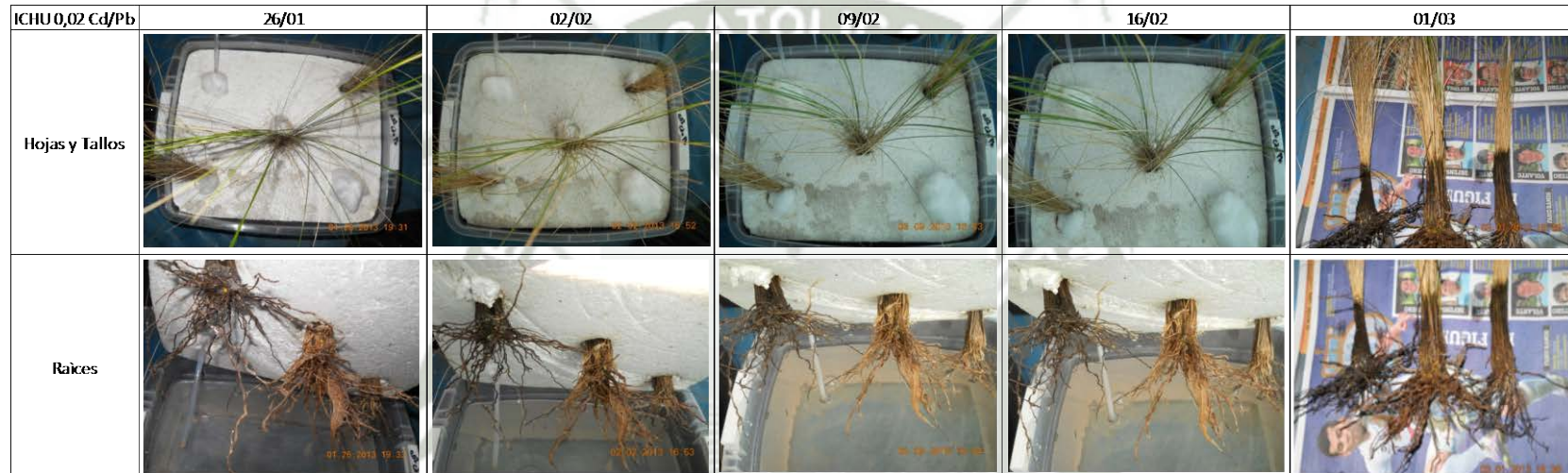


Figura N° 60 Tratamiento a 50 ppm de Pb y Cd

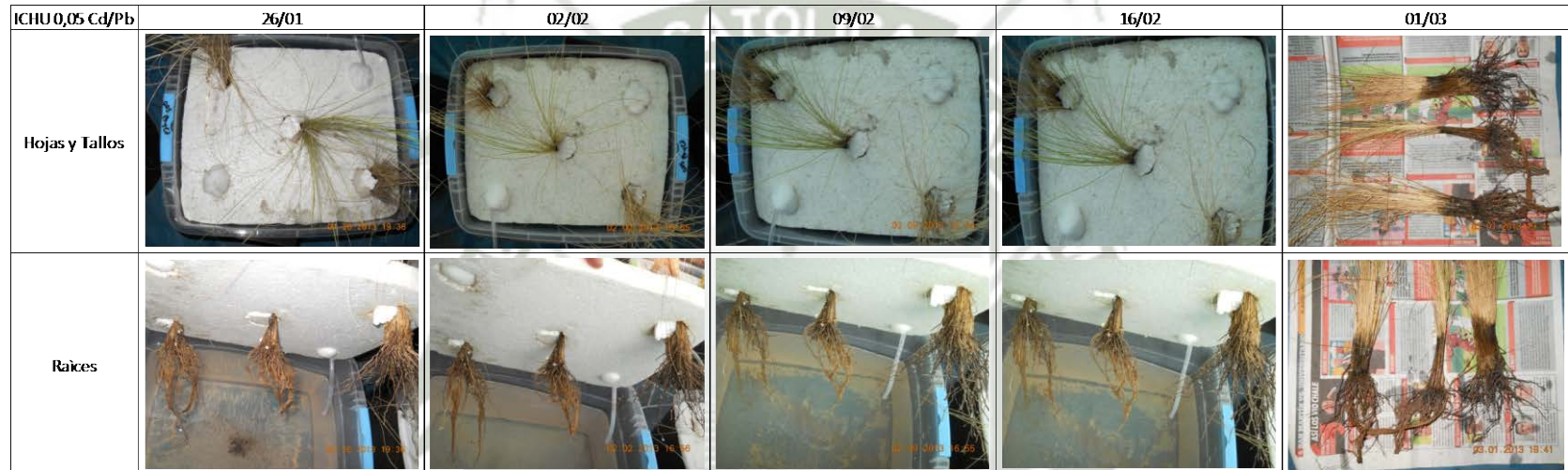


Figura N° 61 Tratamiento a 80 ppm de Pb y Cd

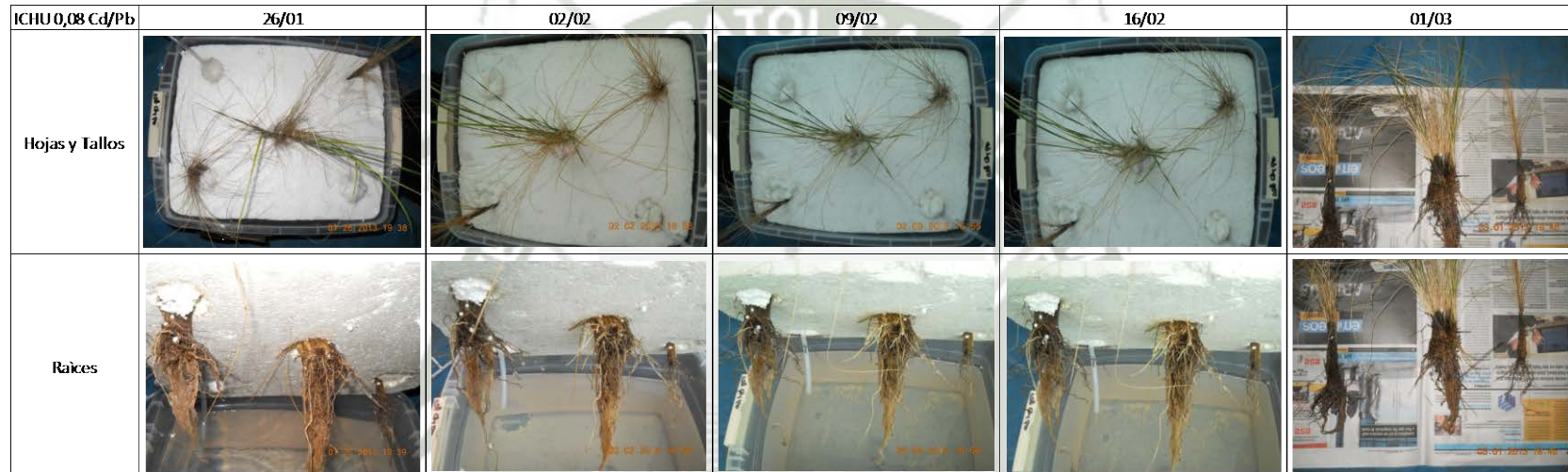


Figura N° 62 Blanco

