

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**“FUENTES FOSFATADAS EN DOS SUELOS EN LA CONCENTRACIÓN  
DE CADMIO FOLIAR EN MAÍZ BAJO CONDICIONES DE  
INVERNADERO”**

**Presentado por:**

**MILAGROS ALEXANDRA ABANTO AGUIRRE**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÓNOMO**

**Lima – Perú**

**2016**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE AGRONOMIA**

**“FUENTES FOSFATADAS EN DOS SUELOS EN LA CONCENTRACIÓN  
DE CADMIO FOLIAR EN MAÍZ BAJO CONDICIONES DE  
INVERNADERO”**

**Presentado por:  
ABANTO AGUIRRE MILAGROS ALEXANDRA**

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

**Sustentada y Aprobada ante el siguiente jurado:**

---

**Ing. Mg. Sc. Julián Chura Chuquija  
PRESIDENTE**

---

**Dr. Oscar Loli Figueroa  
PATROCINADOR**

---

**Ing. Mg. Sc. Luis Tomassini Vidal  
MIEMBRO**

---

**Ing. Mg. Sc. Guillermo Aguirre Yato  
MIEMBRO**

**Lima - Perú  
2016**

**Dedicado a:**

A mi abuela, Isabel Céspedes Doelle, quien pese a la distancia es y será mi mayor fuente de inspiración.

A mis padres, Milagros y José, por acompañarme y apoyarme en todo momento.

Y a mi abuelo, Miguel Aguirre, por ser otro de mis principales motivos para poder culminar este reto.

## **AGRADECIMIENTOS**

Infinitos, al Doctor Oscar Loli Figueroa, por todos sus consejos y ayuda incondicional durante la ejecución de este trabajo de investigación.

A todos los profesores del Departamento Académico de Suelos, especialmente al profesor Rubén Bazán, también a la Sra. Rossmery y al Sr. Mario, por toda su paciencia y ayuda durante esta investigación.

## RESUMEN

El fósforo es un macronutriente primario y esencial, el cual es usado comúnmente en el programa de fertilización por todos los agricultores en la cotidianidad; sin embargo, además de aportar este elemento per se, aporta también impurezas, dentro de las cuales se identifica el cadmio. Este es un metal altamente tóxico y pre cancerígeno, y sus concentraciones en el suelo con el pasar del tiempo no disminuyen, más bien aumentan. Del mismo modo, las plantas lo extraen, transfiriéndose en la cadena trófica y dañando a los humanos. Por estos motivos, nació la iniciativa de llevar a cabo el siguiente trabajo de investigación, en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos de la UNALM, con el objetivo de determinar el efecto del cadmio en plantas de maíz en distintas fuentes de fertilizantes fosfatados y bajo distintas dosis, así como su interacción en dos tipos de suelos. Los tratamientos considerados fueron dos fuentes de fósforo (fosfato diamónico y roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico), en tres dosis (50 ppm, 100 ppm y 200 ppm) interaccionando en dos tipos de suelo (franco arenoso y arenoso), dispuestos en un diseño completamente al azar con arreglo factorial  $2 \times 3 \times 2$  con dos testigos adicionales. Los resultados mostraron un incremento de la materia seca conforme se incrementaron los niveles de fósforo, logrando una mayor producción de materia seca con la aplicación de 200 ppm de P, siendo la fuente fosfato diamónico la que mayor acumulación de materia seca presentó, así como el suelo arenoso. En cuanto a la extracción total de cadmio, se observó que ésta se relaciona directamente con la cantidad de fertilizante fosfatado aplicado. El tratamiento sin aplicación de fósforo y con roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico como fuente de P, fueron los tratamientos que mostraron las menores extracciones de cadmio por el cultivo. La aplicación de fosfato diamónico fue el tratamiento que mostró la mayor extracción total de cadmio en las plantas de maíz. Asimismo, bajo el suelo arenoso usado como sustrato, la presencia de cadmio en los tejidos del cultivo se incrementó.

**Palabras clave:** fuentes fosfatadas, absorción, materia seca, suelo, extracción, cadmio.

## SUMMARY

Phosphorus is a main and essential macronutrient, which is commonly used by the fertilization program of all the farmers in their daily labours. However, phosphorus does not only provide the element per se, it also provides impurities, as cadmium. This is a highly toxic metal and is pre-carcinogen, and its concentrations in the soil through the time do not decrease. In the same way, plants extract it and they transfer it to the food chain, affecting people's health. For these reasons, there was a initiative of doing this research project, thanks to UNALM's Soil Fertility Laboratory, with the objective of identify the effect of cadmium in maize plants under different sources of phosphate fertilizers, different doses and different types of soil. The considered treatments were two sources of phosphorus (diammonium phosphate and acidulated phosphate rock with sulfuric acid), three doses (50 ppm, 100 ppm and 200 ppm), interacting with two types of soils (sandy loam soil and sandy soil), arranged in a completely randomized design (2x3x2), with two additional control treatments. The results showed an increase in dry matter as phosphorus levels were increased, achieving a better production of dry matter with the application of 200 ppm of phosphorus. On the other hand, diammonium phosphate was the source which gave the highest accumulation of dry matter, as the sandy soil also did. According to the total extraction of cadmium, there was a direct relation between cadmium extraction and amount of phosphate fertilizer applied. The treatment without phosphorus application (control) and the acidulated phosphate rock with sulfuric acid were the treatments that showed the lowest cadmium extraction by the maize crop. The application of diammonium phosphate was the treatment that showed the highest total extraction of cadmium in the maize plants. Also, under the sandy soil the presence of cadmium in the vegetal tissues was increased.

**Key words:** phosphate sources, absorption, dry matter, soil, extraction, cadmium.

# ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
<b>RESUMEN</b>	
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b>	3
2.1. METALES PESADOS EN SUELOS AGRÍCOLAS	3
2.2. ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO POR METALES PESADOS	6
2.2.1. Origen natural	6
2.2.2. Origen antropogénico	6
2.3. FACTORES QUE AFECTAN LA DISPONIBILIDAD DE LOS METALES PESADOS EN LOS SUELOS	10
2.3.1. El pH	11
2.3.2 Materia orgánica o humus	13
2.3.3 Compost	14
2.3.4 Calcio	15
2.3.5 Composición granulométrica de los suelos	15
2.4. CADMIO	15
2.4.1. Características físico químicas del cadmio	15
2.4.2. Cadmio en el suelo	16
2.4.3 Fuentes de contaminación del cadmio	18
2.4.4 Los fertilizantes y el cadmio	18
2.4.5 Ingreso, transporte y acumulación del cadmio en plantas	19
2.4.6 Toxicidad del cadmio en plantas	21
2.4.7 Estrategias de tolerancia al cadmio	24
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	26
3.1. UBICACIÓN	26
3.2. MATERIALES EMPLEADOS	26
3.2.1. Suelo:	26

3.2.2. Agua	27
3.2.3. Cultivo Indicador	28
3.2.4. Fertilizantes empleados	29
3.2.5. Implementos y equipos	32
3.3. METODOLOGÍA	32
3.3.1. Instalación del experimento	34
3.3.2 Cosecha	35
3.3.3. Análisis químico	36
3.3.4. Segunda campaña	36
3.3.5. Cronología del experimento	36
3.4. DISEÑO ESTADÍSTICO	37
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>	41
4.1. ANÁLISIS DE MATERIA SECA EN PLANTAS DE MAÍZ	41
4.1.1 Peso de las plantas de maíz	41
4.1.2 Efecto de las fuentes de fósforo aplicados en el peso de las plantas de maíz	43
4.1.3 Efecto de los tipos de suelo en el peso de las plantas de maíz	45
4.1.4 Efecto de la aplicación de fósforo y los tipos de suelo en el peso de las plantas de maíz	47
4.1.5 Efecto de la aplicación de los diferentes niveles de fósforo y tipos de suelo en el peso de las plantas de maíz	48
4.2 ANÁLISIS DE EXTRACCIÓN TOTAL DE CADMIO EN PLANTAS DE MAÍZ.	50
4.2.1 Efecto de los niveles de fósforo aplicado en la extracción de cadmio en plantas de maíz	50
4.2.2. Efecto de las fuentes de fósforo aplicado en la extracción de cadmio en plantas de maíz	53
4.2.3. Efecto de dos tipos de suelo en la extracción de cadmio en plantas de maíz.	57
4.2.4 Efecto de la aplicación de fósforo y tipos de suelo en la extracción de cadmio en plantas de maíz.	61

4.2.5. Efecto de la aplicación de los diferentes niveles de fósforo y tipos de suelo en la extracción total de cadmio en plantas de maíz	62
<b>V. CONCLUSIONES</b>	64
<b>VI. RECOMENDACIONES</b>	66
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	67
<b>VIII. ANEXOS</b>	82

## INDICE DE CUADROS

	<b>Pág.</b>
<b>Cuadro 1:</b> Concentración típica de metales pesados ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en los principales tipos de rocas.	5
<b>Cuadro 2:</b> Valores típicos del contenido de Cadmio en algunos fosfatos de roca en el mundo.	10
<b>Cuadro 3:</b> Propiedades del cadmio.	16
<b>Cuadro 4:</b> Análisis físico-mecánico y químico de los suelos usados.	27
<b>Cuadro 5:</b> Resultados del Análisis de agua.	28
<b>Cuadro 6:</b> Resultados de las concentraciones de Cd (ppm) en los dos fertilizantes utilizados.	31
<b>Cuadro 7:</b> Fuentes de fósforo, dosis de fósforo, en suelo franco arenoso.	33
<b>Cuadro 8:</b> Fuentes de fósforo, dosis de fósforo, en suelo arenoso.	33
<b>Cuadro 9:</b> Análisis de variancia individual para cada experimento	39
<b>Cuadro 10:</b> Análisis de variancia combinado	39
<b>Cuadro 11:</b> Dosis de fósforo en la interacción fosfato diamónico x suelo arenoso del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.	42
<b>Cuadro 12:</b> Dosis de fósforo en la interacción fosfato diamónico x suelo franco arenoso del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.	42
<b>Cuadro 13:</b> Dosis de fósforo en la interacción roca fosfórica x suelo arenoso del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.	42
<b>Cuadro 14:</b> Dosis de fósforo en la interacción roca fosfórica x suelo franco arenoso del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.	42
<b>Cuadro 15:</b> Fuente en la interacción dosis 50 ppm x suelo arenoso del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.	43
<b>Cuadro 16:</b> Fuente en la interacción dosis 50 ppm x suelo franco arenoso del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.	43

<b>Cuadro 17:</b> Fuente en la interacción dosis 100 ppm x suelo arenoso del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.	44
<b>Cuadro 18:</b> Fuente en la interacción dosis 100 ppm x suelo franco arenoso del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.	44
<b>Cuadro 19:</b> Fuente en la interacción dosis 200 ppm x suelo arenoso del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.	44
<b>Cuadro 20:</b> Fuente en la interacción dosis 200 ppm x suelo franco arenoso del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.	44
<b>Cuadro 21:</b> Tipos de suelo en la interacción dosis 50 ppm x fosfato diamónico del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.	46
<b>Cuadro 22:</b> Tipos de suelo en la interacción dosis 50 ppm x roca fosfórica del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.	46
<b>Cuadro 23:</b> Tipos de suelo en la interacción dosis 100 ppm x roca fosfórica del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.	46
<b>Cuadro 24:</b> Tipos de suelo en la interacción dosis 200 ppm x roca fosfórica del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.	46
<b>Cuadro 25:</b> Dosis de fósforo en la interacción fosfato diamónico x suelo arenoso de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.	50
<b>Cuadro 26:</b> Dosis de fósforo en la interacción fosfato diamónico x suelo franco arenoso de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.	50
<b>Cuadro 27:</b> Dosis de fósforo en la interacción roca fosfórica x suelo arenoso de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	50
<b>Cuadro 28:</b> Dosis de fósforo en la interacción roca fosfórica x suelo franco arenoso de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	50
<b>Cuadro 29:</b> Dosis de fósforo en la interacción fosfato diamónico x suelo arenoso de la absorción de cadmio radicular (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	51

<b>Cuadro 30:</b> Dosis de fósforo en la interacción fosfato diamónico x suelo franco arenoso de la absorción de cadmio radicular (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	52
<b>Cuadro 31:</b> Dosis de fósforo en la interacción roca fosfórica x suelo arenoso de la absorción de cadmio radicular (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	52
<b>Cuadro 32:</b> Dosis de fósforo en la interacción roca fosfórica x suelo franco arenoso de la absorción de cadmio radicular (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	52
<b>Cuadro 33:</b> Fuente en la interacción dosis 50 ppm x suelo arenoso de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	54
<b>Cuadro 34:</b> Fuente en la interacción dosis 50 ppm x suelo franco arenoso de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	54
<b>Cuadro 35:</b> Fuente en la interacción dosis 100 ppm x suelo arenoso de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	54
<b>Cuadro 36:</b> Fuente en la interacción dosis 100 ppm x suelo franco arenoso de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	54
<b>Cuadro 37:</b> Fuente en la interacción dosis 200 ppm x suelo arenoso de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	55
<b>Cuadro 38:</b> Fuente en la interacción dosis 200 ppm x suelo franco arenoso de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	55
<b>Cuadro 39:</b> Fuente en la interacción dosis 50 ppm x suelo franco arenoso de la absorción de cadmio radicular (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	56
<b>Cuadro 40:</b> Fuente en la interacción dosis 100 ppm x suelo franco arenoso de la absorción de cadmio radicular (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	56
<b>Cuadro 41:</b> Fuente en la interacción dosis 200 ppm x suelo arenoso de la absorción de cadmio radicular (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	56

<b>Cuadro 42:</b> Fuente en la interacción dosis 200 ppm x suelo franco arenoso de la absorción de cadmio radicular (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	56
<b>Cuadro 43:</b> Tipos de suelo en la interacción dosis 100 ppm x fosfato diamónico de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	58
<b>Cuadro 44:</b> Tipos de suelo en la interacción dosis 200 ppm x fosfato diamónico de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	58
<b>Cuadro 45:</b> Tipos de suelo en la interacción dosis 50 ppm x roca fosfórica de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	58
<b>Cuadro 46:</b> Tipos de suelo en la interacción dosis 100 ppm x roca fosfórica de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	58
<b>Cuadro 47:</b> Tipos de suelo en la interacción dosis 200 ppm x roca fosfórica de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	59
<b>Cuadro 48:</b> Tipos de suelo en la interacción dosis 100 ppm x fosfato diamónico de la absorción de cadmio radicular (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	59
<b>Cuadro 49:</b> Tipos de suelo en la interacción dosis 100 ppm x roca fosfórica de la absorción de cadmio radicular (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	60
<b>Cuadro 50:</b> Tipos de suelo en la interacción dosis 200 ppm x roca fosfórica de la absorción de cadmio radicular (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad	60

## INDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1:</b> Fuentes de contaminación en el sistema suelo-planta.	8
<b>Figura 2:</b> Mecanismos de ingreso, secuestro y traslocación del Cd en raíces.	20
<b>Figura 3:</b> Esquema de la respuesta celular al cadmio.	24

## INDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO 1: Materia seca de plantas de maíz en diferentes fuentes y dosis de fuentes fosfatadas en suelo franco arenoso.	83
ANEXO 2: Materia seca de plantas de maíz en diferentes fuentes y dosis de fuentes fosfatadas en suelo arenoso.	84
ANEXO 3: Extracción y concentración de cadmio total de plantas de maíz con diferentes fuentes y dosis de fósforo, en suelo franco arenoso	85
ANEXO 4: Extracción y concentración de cadmio total de plantas de maíz con diferentes fuentes y dosis de fósforo, en suelo arenoso	86
ANEXO 5: Análisis de varianza de la materia seca foliar (g/pl.) en plantas de maíz en suelo arenoso	86
ANEXO 6: Análisis de varianza de la materia seca radicular (g/pl.) en plantas de maíz en suelo arenoso	87
ANEXO 7: Análisis de varianza de la materia seca foliar (g/pl.) en plantas de maíz en suelo franco arenoso	87
ANEXO 8: Análisis de varianza de la materia seca radicular (g/pl.) en plantas de maíz en suelo franco arenoso	88
ANEXO 9: Análisis de varianza de la extracción de cadmio foliar (mg de Cd/planta) en plantas de maíz en suelo arenoso.	88
ANEXO 10: Análisis de varianza de la extracción de cadmio radicular (mg de C/planta) en plantas de maíz en suelo arenoso.	88
ANEXO 11: Análisis de varianza de la extracción de cadmio foliar (mg de C/planta) en plantas de maíz en suelo franco arenoso.	89
ANEXO 12: Análisis de varianza de la extracción de cadmio radicular (mg de C/planta) en plantas de maíz en suelo franco arenoso.	89
ANEXO 13: Prueba de Homogeneidad de Errores	89
ANEXO 14: Análisis de varianza de la materia seca foliar (g/pl.) en plantas de maíz con diferentes dosis y fuentes de fósforo y dos tipos de suelo.	90
ANEXO 15: Análisis de varianza de extracción de cadmio en la materia seca de la parte foliar (mg de Cd/planta) con diferentes dosis, fuentes de fósforo y dos tipos de suelo en la bioacumulación de cadmio en plantas de maíz.	90
ANEXO 16: Análisis de varianza de extracción de cadmio en la materia seca de la parte radicular (mg de Cd/planta) con diferentes dosis, fuentes de fósforo y dos tipos de suelo en la bioacumulación de cadmio en plantas de maíz.	91

ANEXO 17: Análisis de variancia de efectos simples de la materia seca foliar (g/pl.) en plantas de maíz con diferentes dosis y fuentes de fósforo y dos tipos de suelo.	91
ANEXO 18: Efectos simples de la extracción de cadmio en la materia seca foliar (mg de Cd/planta) en plantas de maíz con diferentes dosis y fuentes de fósforo y dos tipos de suelo.	92
ANEXO 19: Efectos simples de la extracción de cadmio en la materia seca radicular (mg de Cd/planta) en plantas de maíz con diferentes dosis y fuentes de fósforo y dos tipos de suelo.	92
ANEXO 20: Extracción Total de Cadmio por planta promedio en los diferentes niveles de fósforo aplicado (mg Cd/planta).	93
ANEXO 21: Extracción Total de Cadmio por planta promedio en las diferentes fuentes de fósforo aplicado (mg Cd/planta).	93
ANEXO 22: Extracción Total de Cadmio por planta promedio en los dos distintos tipos de suelo (mg Cd/planta).	93

## I. INTRODUCCIÓN

La actividad minera es la que representa el sector económico y productivo más explotado en el país, esta explotación se da en ciudades muy reconocidas como Cajamarca, Cusco, Arequipa e Ica, donde la agricultura es también un eje económico primordial. En dicho caso, es obvia la contaminación de los suelos y de las aguas de ríos, la misma que afectaría a los vegetales producidos en dichas zonas.

Dentro de estos residuos contaminantes de la minería (conocidos también como ETM: Elementos Traza Metálicos), se encuentra el cadmio, el cual a pesar de ser un metal pesado no esencial y poco abundante en la corteza terrestre, está causando serios problemas de toxicidad y contaminación de suelos en los cultivos.

También se han publicado investigaciones que aseveran que el uso de fertilizantes fosfatados derivados de la roca fosfórica aporta cadmio al suelo (McLaughlin et al., 1996), por presentarlo como constituyente en su elaboración (Iretskaya y Chien, 1999), quedando metales como impurezas o trazas (Carbonell et al., 1999).

Por lo tanto, en el Perú y en los países en vías de desarrollo, las fuentes de contaminación por cadmio se deben principalmente a las actividades mineras, al uso de fertilizantes fosfatados y a los residuos industriales que, en su mayoría, no reciben tratamiento alguno.

Asimismo, el cadmio ha sido catalogado como un metal cancerígeno en el año 1993 por el IARC (*International Agency for Research on Cancer*), y se le considera pre cancerígeno para el humano cuando este ingiere vegetales contaminados, ya que el cadmio se acumula en distintas concentraciones ya sea en la hoja, grano o raíz.

Por lo tanto el problema no sólo radica en la contaminación de aguas, suelos y plantas, sino que abarca temas de seguridad alimentaria y atenta contra la salud humana, ya que los efectos negativos pueden ser: anemia, hipertensión, trastornos renales y pulmonares (Nebel y Wright, 1999).

Para poder determinar la absorción de cadmio en plantas de maíz, se presentan los siguientes objetivos:

### **OBJETIVO GENERAL**

- Evaluar el efecto de la fertilización fosfatada y dos tipos de suelos en la absorción de cadmio en la materia seca de las plantas de maíz.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Establecer el efecto de la aplicación de diferentes fertilizantes fosfatados en la absorción de cadmio por plantas de maíz.
- Determinar el efecto de distintos niveles de fósforo aplicado en la absorción de cadmio por plantas de maíz.
- Evaluar el efecto de dos tipos de suelo, sobre la absorción de cadmio por plantas de maíz.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. METALES PESADOS EN SUELOS AGRÍCOLAS

Un metal pesado es cualquier elemento químico que tenga una densidad relativamente alta y sea tóxico o venenoso en concentraciones incluso muy bajas (Lucho et al., 2005); estos tienen una densidad igual o superior a  $6 \text{ g/cm}^3$  cuando están en forma elemental y en número atómico son superiores a 20 (excluyendo a los metales alcalinos o alcalinotérreos). Su presencia en la corteza terrestre es inferior al 0.1% y casi siempre menor del 0.01% (Kabata-Pendias, 1995).

Según algunos autores, esta definición un tanto ambigua y prefieren utilizar la denominación de metales traza (Ward, 1995). Bajo esta denominación se engloban todos los elementos presentes a concentraciones no detectables mediante técnicas de análisis clásicas, de forma que se considera elemento traza a los elementos detectables en un rango de concentración 100 a  $0.01 \text{ mg kg}^{-1}$  y se reserva el término ultratrazas a niveles comprendidos entre  $0.01 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $10 \text{ ug kg}^{-1}$ .

Los metales pesados son altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos. Son, principalmente: Cd, Hg, Pb, Cu, Ni, Sb, Bi.

En los suelos, los metales pesados más abundantes son el Mn, Cr, Zn, Ni y Pb (1-1500 mg/kg; el Mn puede llegar a 10000 mg/kg). En menores concentraciones se encuentran el Co, Cu y As (0.1-250 mg/kg) y con mínimos porcentajes el Cd y Hg (0.01-2 mg/kg).

Entre los iones metálicos más tóxicos resaltan el Cd y Hg. El cadmio se encuentra en forma catiónica y sus propiedades se asemejan a las del ión calcio.

Los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir cuatro diferentes vías:

- Pueden quedar retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la solución del suelo o bien fijados por procesos de adsorción, complejación y precipitación
- Pueden ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a cadenas tróficas
- Pueden pasar a la atmósfera por volatilización

- Pueden mobilizarse a las aguas superficiales o subterráneas

Los riesgos producidos por estos metales pesados dependen de:

- La toxicidad
- El carácter acumulativo de cada elemento, destacando aquellos metales que presenten un índice de bioacumulación superior a 1. El concepto de bioacumulación se refiere a la acumulación de contaminantes en los organismos y el índice de bioacumulación se expresa por la relación entre la cantidad de un contaminante en el organismo y la concentración de ese contaminante en el suelo.

Los metales pesados han sido objeto de atención por sus características contaminantes peculiares (Facchinelli et al., 2001):

- Poseen carácter acumulativo: su concentración no disminuye con el tiempo.
- Son necesarios y beneficiosos para las plantas y otros organismos a determinados niveles, pero también son tóxicos cuando exceden ciertos niveles de concentración.
- Están siempre presentes en los suelos a ciertos niveles de concentración denominados niveles de fondo, cuyo origen no es externo, sino que proviene del material parental originario de las rocas y su transformación.
- Se encuentran frecuentemente como cationes, los cuales interactúan fuertemente con la matriz del suelo. Además, en altas concentraciones, pueden encontrarse en forma química no dañina o inerte. Sin embargo estos metales pueden mobilizarse y cambiar de forma química debido a cambios en las condiciones medio ambientales, cambios en el uso del suelo o por saturación de la capacidad de tamponamiento del suelo. Por esta razón se les ha catalogado como bomba de relojería química (Stigliani, 1992).

La composición química de la roca madre (ver Cuadro 1) y los procesos de meteorización condicionan, de forma natural, la concentración de diferentes metales pesados en suelos (Tiller, 198; Ross, 1994 b). Los rangos presentados por Ross son muy variables en función del tipo de roca de la que se trate y, generalmente, las concentraciones son mucho mayores en las rocas ígneas. Este hecho implica que rangos de concentración natural de los metales en los suelos pueden ser amplios y están condicionados, básicamente, por el tipo de roca madre y el grado de meteorización de la misma. Estos factores dependen en gran medida de la zona de estudio, por lo que existe una importante variabilidad espacial en la concentración de metales en los suelos.

**Cuadro 1: Concentración típica de metales pesados (mg kg<sup>-1</sup>) en los principales tipos de rocas.**

ROCAS	ELEMENTOS									
	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Sn	Zn
<b>Rocas Ígneas</b>										
Ultrabásicas	0.12	110-150	2000-2980	10-42	0.004	1040-1300	2000	0.1-14	0.5	50-58
Básicas	0.13-0.2	35-50	200	90-100	0.01-0.08	1500-2200	150	3-5	1-1.5	100
Granito	0.009-0.2	1	4	10-13	0.08	400-500	0.5	20-24	3-3.5	40-52
<b>Roca Sedimentaria</b>										
Calcáreas	0.028-0.1	0.028-0.1	10-11	5.5-15	0.05-0.16	620-1100	7-12	5.7-7	0.5-4	20-25
Areniscas	0.05	0.05	35	30	0.03-0.29	4-60	2-9	8-10	0.5	16-30
Metamórficas	0.2	0.2	90-100	39-50	0.18-0.5	850	68-70	20-23	4-6	100-120

FUENTE: Ross 1994, a.

## **2.2 ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO POR METALES PESADOS**

Los metales pesados están presentes en el suelo como componentes naturales del mismo o como consecuencia de las actividades antropogénicas.

### **2.2.1. Origen natural**

Cuando los metales pesados atraviesan el proceso de meteorización, se concentran en los suelos y estas concentraciones naturales pueden llegar a ser tóxicas, debido a que pueden ocasionar acumulación de algún metal en plantas y causar efectos tóxicos para los animales que la consumen. En suelos los más abundantes ( $1-1500 \text{ mg kg}^{-1}$ ) son el manganeso, cromo, zinc, níquel y plomo (Sánchez, 2003).

La actividad volcánica es la mayor fuente natural de eliminación de cadmio a la atmósfera. Los elementos trazas menores son significativamente inferiores en las cenizas volcánicas que en el suelo subyacente. En el caso del cadmio son, en general, similares o menores a los encontrados en el suelo.

### **2.2.2. Origen antropogénico**

Diversas actividades del hombre incrementan la concentración natural, entre las que destacan la minería, la fundición, la producción energética, la actividad industrial, la producción y uso de plaguicidas, el tratamiento y depósito/vertido de residuos, etc. (Weber y Karczewska, 2004).

La entrada de metales en los suelos agrícolas se produce, en su mayoría, desde los fertilizantes, plaguicidas, estiércol y, también, desde la atmósfera (Alloway y Jackson, 1991). Por ejemplo, los fertilizantes fosfatados aportan una cantidad importante de Cd, y para el control de plagas se ha utilizado sales de Zn y arsenatos de Cu y Pb (Tiller, 1989). También el agua de riego y el uso cada vez más extendido de enmiendas orgánicas o biosólidos, entre los que destacan los lodos de depuradora y composts realizados a partir de residuos sólidos urbanos (RSU) o de residuos industriales, son importantes fuentes de metales en los suelos agrícolas (Nicholson et al., 2003). En Europa, estas actividades se han incrementado desde hace varias décadas. Este hecho hace que, hoy en día, sea muy

difícil identificar una zona en la que se tenga la certeza de que nunca ha habido entrada de metales pesados de origen antrópico (Kabata-Pendias, 1995).

#### **a) Origen por medio de residuos orgánicos**

La utilización de residuos orgánicos como enmiendas a suelos hortícolas produce un incremento, entre otras características, del contenido de materia orgánica, el cual es un efecto positivo en la agregación del suelo y un mayor aporte de micronutrientes, que puede inducir un aumento en la producción agrícola (Zheljazkov y Warman, 2004). Sin embargo, el contenido de contaminantes orgánicos y metales pesados, que limita la cantidad que se puede adicionar sin suponer un riesgo para la salud humana, quizás merman los efectos beneficiosos de las enmiendas orgánicas (Sánchez-Monedero et al., 2004).

Se deben regular los niveles máximos permitidos en los residuos orgánicos para uso agrícola para evadir problemas derivados con un exceso de metales.

#### **b) Origen por medio del agua de riego y productos químicos**

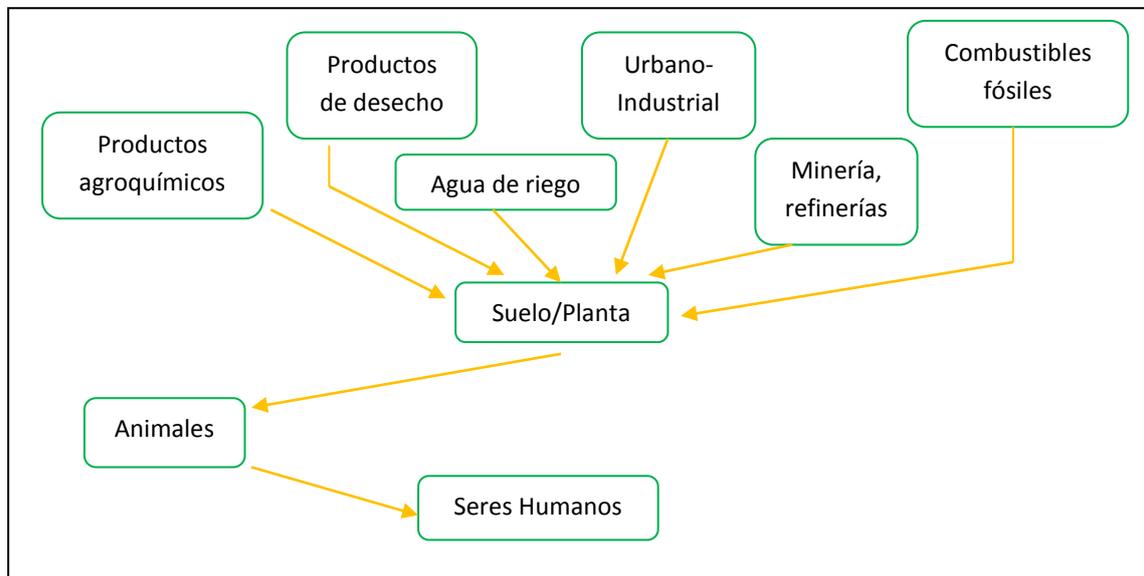
El uso de fertilizantes, principalmente de síntesis, representa un potencial riesgo de contaminación de metales pesados a los acuíferos subterráneos cuando su aplicación se realiza en ausencia de las consideraciones agronómicas que contemplan el balance de nutrientes entre el consumo de los cultivos y el aportado por los suelos (Reynoso et al., 2004). De esta manera se contaminan las aguas subterráneas que en su mayoría son utilizadas para el riego de cultivos.

Además de los fertilizantes, la aplicación de plaguicidas es otro problema de contaminación. Se ha establecido que sólo el 0.1 % de la cantidad de plaguicidas aplicado llega a la plaga, mientras que el restante circula por el medio ambiente, contaminando posiblemente el suelo, agua y la biota; por lo tanto, se hace necesario caracterizar el destino final y la toxicidad no prevista de estos plaguicidas para evaluar con certeza el riesgo asociado a su uso (Carvalho et al., 1998).

### c) Origen por medio de las minerías y refinерías

La actividad económica de mayor tradición es la industria minera, la cual es mayoritariamente metálica y se dedica principalmente a la producción de cobre, zinc, plata, cadmio y plomo. Esta industria tiene un alto impacto ambiental, ya que afecta desde el subsuelo hasta la atmósfera, incluyendo suelos y cuerpos de agua. Debido al procesamiento de los recursos minerales, se han generado grandes cantidades de residuos sólidos, líquidos y gaseosos que han ocasionado una gran cantidad de sitios contaminados (Monge et al., 2008).

En la siguiente figura se muestran las posibles fuentes de metales hacia el sistema agrícola, tanto al suelo como a los cultivos. También se indica la transferencia de los metales desde el sistema suelo-planta a los seres humanos. Por lo tanto, se puede observar que la contaminación por metales pesados de los suelos puede afectar de manera directa a la salud humana (Nriagu, 1990). Los metales pueden llegar a los seres humanos desde el suelo bien por ingestión directa o a través de la ingestión de plantas y/o animales, aunque también a través del aire y las aguas superficiales (Oliver, 1997).



Fuente: Weber y Karczewska, 2004.

**Figura 1: Fuentes de contaminación en el sistema suelo-planta.**

Este tema tiene su origen en una tragedia que aconteció en Japón, en los años 60, en que el envenenamiento (enfermedad itai) estuvo asociado con la utilización de arroz cultivado en campos regados con agua que contenía cadmio proveniente de mina. (Tito, 2003.)

Por otro lado, de manera indirecta, la contaminación por metales pesados tiene efectos sobre el bienestar del ser humano al interferir en la "salud" ambiental.

#### **d) Origen por medio de fertilizantes**

La roca fosfórica es un mineral que presenta bajas cantidades de cadmio, por lo que al servir éste de fuente en la elaboración de fertilizantes fosfatados, estos presentan concentraciones de cadmio diferentes (Mansilla, 2013). Existe también preocupación de que la utilización de fertilizantes fosfatados aumente lentamente el contenido de cadmio en la tierra cultivable y que esto pudiera dar lugar, con el tiempo, a que exista un nivel de cadmio en los productos agrícolas que exceda los niveles aceptables.

Por otro lado, las cantidades importadas de fosfato diamónico en el Perú variaron entre 157 298 toneladas en el año 2013 y 172 501 toneladas en el año 2014. Este fertilizante proviene en un 81% de Estados Unidos, pero también resaltan países como México y Estonia.

Según la FAO, el Perú produjo 15 mil toneladas de roca fosfórica en el 2000 y en el 2002 se consumieron 65 000 toneladas, de las cuales 60 000 fueron importadas. La roca fosfórica últimamente se ha estado tomando en cuenta como una alternativa rápida y económica de reemplazar los fertilizantes del mercado que año tras año aumentan de precio, y también se presenta como una oportunidad de exportación y dinámica del mercado.

Es importante destacar que en los últimos años algunos países de Latinoamérica como Perú, México, Venezuela y Brasil por su creciente demanda han descubierto importantes depósitos incrementando significativamente sus reservas, sin embargo solo Perú se mantiene como exportador aunque de pequeños volúmenes.

Cabe resaltar que la cantidad de cadmio y de otros oligoelementos, pueden variar dentro de un mismo depósito o yacimiento considerablemente (Norsk, 1989).

Los fertilizantes pueden contener cadmio cuando se utilizan como materia prima el fosfato de roca sedimentaria. Ver Cuadro 2.

**Cuadro 2: Valores típicos del contenido de Cadmio en algunos fosfatos de roca en el mundo.**

Fuente de Roca Fosfórica	Fósforo %	Cadmio	
		mg Cd/Kg de roca	mg Cd/Kg de P
Kola, URSS	17.2	0.15	0.9
Palfos, Sudáfrica	17.2	0.15	0.9
Bou Craa, Marruecos	15.9	35	220
Togo	15.7	55	350
Youssofia, Marruecos	14.6	40	274
Jordania	14.6	5	34
Texas Gulf, EEUU	14.4	40	278
Florida, EEUU	14.2	8	56
Neveg, Israel	14.2	20	140
Khouribga, Marruecos	14.2	16	113
Khneifiss, Siria	13.9	6	43
Gafsa, Tunez	13.2	50	380

FUENTE: Norsk, 1989.

### **2.3. FACTORES QUE AFECTAN LA DISPONIBILIDAD DE LOS METALES PESADOS EN LOS SUELOS**

Estos factores están relacionados con la meteorización química de la roca madre (Ross, 1994a). La solubilidad de los elementos pesados puede estar afectada por las características presentadas por estos y las condiciones medio ambientales.

### **2.3.1. El pH**

El pH del suelo es el factor principal que condiciona los procesos de adsorción en el suelo y la actividad de los metales (Houba et al., 1996), por lo que afecta la adsorción de cadmio, cobre y plomo (Basta et al., 1993). Este efecto ha sido explicado por diversos mecanismos como precipitación, la hidrólisis metálica, adsorción de metales, la competencia de los cationes metálicos por los sitios de intercambio (Basta y Tabatabai, 1992), la ionización de grupos superficiales, el desplazamiento del equilibrio en las reacciones de complejación superficiales, la competencia con  $\text{H}_3\text{O}^+$  y  $\text{Al}^{3+}$  por lo sitios negativos y los cambios en la especiación metálica (Msaky y Calvet, 1990). Además, generalmente, los metales quedan retenidos en el suelo a pH básicos, mientras que a pH ácidos los metales están más solubles siendo, por lo tanto, mayor su disponibilidad para las plantas (Ross 1994a), excepto algunos metales, como el arsénico, selenio y cromo hexavalente, más biodisponibles a pH básicos (McLean y Bledsoe, 1992).

#### **a) Intercambio catiónico**

Los suelos se caracterizan por presentar un sistema coloidal a través del cual puede retener cationes en su superficie (Evans, 1989). De acuerdo con el principio de electro-neutralidad, las cargas negativas en la superficie de los coloides son neutralizadas por una cantidad equivalente de cationes en la solución suelo, los que pueden quedar adsorbidos o retenidos (Silva, 2004).

Esta adsorción de cationes por el suelo es denominada “adsorción no específica”, que se caracteriza cuando el ión es atraído electrostáticamente por las superficies cargadas de la fracción coloidal del suelo, sin que haya una dependencia de configuración electrónica con el grupo funcional de la superficie del suelo, formando complejos llamados de esfera externa (Sposito, 1989). La cantidad de iones que pueden ser adsorbidos de forma intercambiable en el suelo se llama capacidad de intercambio catiónico. En la mayoría de los casos existe selectividad o preferencia de un catión por otro, por lo tanto, es un proceso competitivo y reversible (Silva, 2004). En general, la adsorción de los metales a las partículas del suelo reduce la concentración de los metales en la solución del suelo. Así, un suelo con una capacidad de intercambio catiónico alta, tiene más sitios de intercambio en

la fracción coloidal del suelo, los que estarán disponibles para una mayor adsorción y posible inmovilización de los metales (Silveira et al., 2003).

### **b) Adsorción específica**

La adsorción específica se produce por la afinidad de algunos cationes metálicos por un sitio particular de adsorción, por esta razón los metales son adsorbidos específicamente en cierto orden de preferencia, por ejemplo  $Cd < Zn < Cu < Pb$ ; por lo tanto, los metales no siempre están afectados por la competencia de otros cationes (Alloway, 1995). Se caracteriza por ser fácilmente reversible.

Es un fenómeno de alta afinidad, involucrando mecanismos de intercambio entre el metal y el ligando de la superficie de los coloides por medio de enlaces covalentes o iónicos. Este término ha sido utilizado para explicar la razón por la cual algunos suelos adsorben determinados cationes en concentraciones superiores a su capacidad de intercambio catiónico (Alloway, 1995). Los metales pesados que se encuentran como aniones: arsénico (As), selenio (Se), molibdeno (Mo), también pueden presentar adsorción específica en las superficies de los óxidos e hidróxidos hidratados. La adsorción específica es altamente dependiente del pH e involucra a los coloides orgánicos e inorgánicos (materia orgánica y óxidos hidratados de Al, Fe y Mn), y ocurre cuando la concentración de los metales es baja. Como consecuencia de la adsorción específica, los metales son removidos de la solución suelo y retenidos en la superficie de los coloides formando moléculas estables, llamadas complejos de esfera interna. Este mecanismo muchas veces no es reversible (Silveira et al., 2003).

### **c) Precipitación**

Las reacciones de precipitación y disolución dependen del producto de solubilidad ( $K_{ps}$ ) del sólido en agua. Los iones metálicos en la solución suelo pueden precipitar con un agente químico, generalmente aniones como fosfato, carbonato o sulfato (Rieuwerts et al., 1998). También pueden precipitar como hidróxidos al reaccionar con los iones oxidrilos presentes en la solución (Basta y Tabatabai, 1992). La precipitación/disolución son procesos que además se ven influenciados por el pH y el potencial redox del suelo.

Las reacciones de precipitación están asociadas normalmente a suelos alcalinos y calcáreos con concentraciones relativamente altas de metales pesados, y además a condiciones que favorezcan una baja solubilidad de estos metales o a la presencia de pocos sitios de adsorción específica (Silva 2004). La precipitación es improbable que suceda en condiciones ácidas, excepto cuando hay grandes cantidades de cationes y aniones. La precipitación de Cd es poco probable que ocurra en suelos neutros y ácidos, excepto cuando hay altas concentraciones de carbonatos, sulfatos o fosfatos (Boekhold et al., 1993).

#### **d) Complejación y quelación**

La complejación de metales involucra a un ión metálico en solución que está siendo rodeado por uno o más ligandos orgánicos o inorgánicos (Rieuwerts et al., 1998). La quelación ocurre cuando un ligando polidentado, generalmente una molécula orgánica grande, ocupa dos o más sitios de coordinación alrededor de un ión metálico central (Bohn et al., 1979). Dentro de los ligandos complejantes orgánicos se encuentran los ácidos cítrico, oxálico y gálico, además de ácidos complejantes más estructurados, como aquellos incluidos en las fracciones húmica y fúlvica solubles (Evans, 1989). Los hidróxidos y el ión cloruro son considerados como los ligandos inorgánicos más importantes (Sposito, 1989).

#### **2.3.2 Materia orgánica o humus**

Los constituyentes de la materia orgánica le proporcionan sitios para la adsorción de metales (grupos funcionales con comportamiento ácido, tales como carboxílicos, fenólicos, alcohólicos, enólicos-OH y grupos aminos), pudiendo ser la principal fuente de la capacidad de intercambio catiónico en las capas superficiales del suelo (McLean y Bledsoe, 1992). Incluso en suelos agrícolas, generalmente con bajas concentraciones de materia orgánica, la contribución de la materia orgánica a la capacidad de intercambio catiónico es significativa, aunque varía en función del tipo de suelo (Kabata-Pendias, 2004). Además, la materia orgánica puede retener a los metales tanto por su capacidad de intercambio catiónico como por su capacidad quelante (Adriano, 2001).

La materia orgánica puede adsorber tan fuertemente a algunos metales, como es el Cu, que pueden quedar en posición no disponible por las plantas. Por eso algunas plantas, de suelos orgánicos, presentan carencia de ciertos elementos como el Cu. El Pb y el Zn forman quelatos solubles muy estables.

La complejación por la materia orgánica del suelo es uno de los procesos que gobiernan la solubilidad y la bioasimilación de metales pesados. La toxicidad de los metales pesados se potencia en gran medida por su fuerte tendencia a formar complejos organometálicos, lo que facilita su solubilidad, disponibilidad y dispersión. La estabilidad de muchos de estos complejos frente a la degradación por los organismos del suelo es una causa muy importante de la persistencia de la toxicidad. Pero también la presencia de abundantes quelatos puede reducir la concentración de otros iones tóxicos en la solución del suelo (García y Dorronsoro, 2011).

### **2.3.3 Compost**

La disminución constante de la materia orgánica en la mayoría de los suelos agrícolas, debido a las intensivas labores agroindustriales, ha incrementado la necesidad del empleo de fertilizantes orgánicos (García et al., 2005). Una alternativa para este problema es el uso de las compostas, las cuales se obtienen mediante el proceso de composteo, que consiste en degradar la materia orgánica para estabilizarla biológicamente, bajo condiciones aerobias controladas. Esto da como resultado un producto final denominado composta, la cual es estable, libre de patógenos y elementos fitotóxicos para las plantas y puede ser aplicada para el mejoramiento de suelos y cultivos (Widman et al., 2005).

La asociación entre los metales pesados y la compostora incluye la hidrosolubilidad, intercambio iónico, precipitación, co-precipitación de óxidos metálicos y absorción por ligandos orgánicos. La fase de asociación y solubilidad de metales cambia durante el proceso del composteo, de tal modo que se alteran las formas de disponibilidad de los metales. Es evidente que los efectos positivos resultantes del uso de composteras compensan por mucho los probables efectos negativos, pero más investigaciones son necesarias, ya que el reciclaje de la materia orgánica para la obtención de compostas para su empleo en zonas agrícolas es un proceso que hoy en día está tomando un mayor auge y representa un mercado para los productores de residuos, ya que es una fuente potencial y barata de materia orgánica y fertilizantes (Iwegbue et al., 2006; Iwegbue et al., 2007).

### **2.3.4 Calcio**

La presencia de altas concentraciones de calcio en los suelos puede reducir la absorción de metales pesados como el cadmio y el cobre por parte de las plantas, debido a que existe una competencia iónica entre ellos. De la misma manera, las altas concentraciones de estos metales pesados puede reducir la absorción de calcio y bajar la concentración de este elemento a nivel de raíces hojas y frutos de las plantas (Österás y Greger, 2006). En la mayoría de suelos donde encontramos presencia de calcio, no únicamente lo encontramos como calcio libre, sino que puede estar como carbonato y fosfato de calcio, en esta situación el cadmio puede ser controlado por la alcalinización del suelo y precipitar al metal pesado, además el efecto competitivo del calcio y las consecuencias fisiológicas y químicas de un incremento del pH del suelo disminuyen la absorción de cadmio por las raíces del cultivo (Contreras et al., 2005).

### **2.3.5 Composición granulométrica de los suelos**

La composición granulométrica de los suelos tiene una gran importancia en la retención de los metales debido a la capacidad de adsorción de las arcillas. Esto hace que una mayor o menor concentración de arcilla condicione, en gran medida, el contenido de metales en los suelos pudiendo incluso relacionarse los contenidos medios de metales pesados agrupándolos en función de las texturas de los suelos analizados (Bak et al., 1997; Assadian et al., 1998).

## **2.4 CADMIO**

### **2.4.1. Características físico químicas del cadmio**

El cadmio es un elemento no esencial y poco abundante en la corteza terrestre (0.1 a 0.2 ppm) (Pinto et al., 2003).

Su símbolo químico es Cd y es un elemento de naturaleza química relativamente raro, su color es blanco-plateado, es maleable y dúctil. Su lugar en la tabla periódica es en el Grupo IIB (metales no ferrosos), tiene una valencia de 2 (divalente), su número atómico es 48, su peso atómico relativo es 112.41 g, su densidad es de 8.642 g/cm<sup>3</sup> a 20° C, su punto de ebullición es de 767° C y su punto de fusión de 320.9° C; su presión de vapor es 0.013 Pa a 180° C, su volumen es de 13.00 cm<sup>3</sup>/mol (García, 2002) y tiene una estructura cristalina hexagonal.

### Cuadro 3: Propiedades del cadmio.

Símbolo químico	Cd
Forma	Blanco, metal suave
Características	Maleable, dúctil y flexible
Punto de fusión	321 °C
Punto de ebullición	765 °C
Número atómico	48
Peso atómico	112.41
Densidad	8.64 g cm <sup>-3</sup>

FUENTE: Stoepler, 1991.

Las características más remarcables del cadmio son su gran resistencia a la corrosión, su bajo punto de ebullición y su excelente conducción eléctrica. Los compuestos de cadmio presentan una gran resistencia a la acción de los compuestos químicos y a las altas temperaturas. El cadmio también se presenta como sustituto del calcio en la apatita y la calcita, pudiendo aumentar sus impurezas en los fertilizantes fosfatados.

Este metal se encuentra debajo del zinc y encima del mercurio en la tabla periódica, por lo que tiene muchas propiedades en común con estos elementos. Es sustituto del zinc en forma de impureza en los minerales de éste.

Debido a su toxicidad, el cadmio se encuentra sujeto a una de las legislaciones más severas en términos ambientales y de salud humana.

#### 2.4.2. Cadmio en el suelo

El cadmio está normalmente presente en el suelo a concentraciones menores de 1 mg/kg, generalmente entre 0.15 y 0.2 mg/kg (Boudene, 1978).

Las principales variaciones en el contenido de cadmio en el suelo se deben a la composición de la roca madre y al suministro de metales que provienen de fertilizantes químicos, pesticidas y la contaminación atmosférica. Los lodos de aguas negras y los

superfosfatos que se utilizan en la agricultura contaminan también el suelo con cadmio, ya que los suelos tratados con ellos pueden llegar a contener hasta 100 mg/kg de cadmio en el peso seco (Bodilla, 1989).

Químicamente, el cadmio se puede encontrar disuelto en el agua contenida en el suelo, adsorbido en superficies orgánicas e inorgánicas, formando parte de minerales, precipitado con otros compuestos del suelo o incorporado a estructuras biológicas. Sin embargo la biodisponibilidad del cadmio por la planta depende de numerosos factores físicos, químicos y biológicos que modifican su solubilidad y el estado del metal en el suelo. Los principales factores son el pH del suelo, el potencial redox, la temperatura y el contenido en arcillas, materia orgánica y agua (Christensen y Haung, 1999).

El aporte de cadmio al suelo proviene de la lluvia ácida y las deposiciones aéreas, así como de los fertilizantes (Hedin et al., 1994).

El cadmio se pierde del suelo o resulta inaccesible como consecuencia de la lixiviación, extracción de los cultivos, o por reacción con los minerales o elementos del suelo, especialmente bajo condiciones de suelos calcáreos.

La absorción de cadmio por el cultivo depende de diferentes factores del suelo (Holmgren et al., 1993; Christensen et al., 1999), entre los que se podría indicar:

(1) Acidez del suelo: su mayor absorción se encuentra fuertemente relacionada con la acidez. El efecto del pH se debe a que los cambios en la acidez del suelo provoca la liberación de algunos cationes adsorbidos en las partículas del suelo, estos cationes a su vez pueden reaccionar con otros modificando su disponibilidad para las plantas.

(2) Contenido de cadmio en el suelo: a mayor contenido de cadmio hay mayor absorción de este elemento por la planta.

(3) Temperatura del suelo: a mayor temperatura hay mayor absorción porque hay mayor velocidad de reacciones y mayor solubilidad.

(4) Unión de los minerales del suelo: a mayor unión, menor absorción del cadmio por el cultivo.

(5) Contenido de humus en el suelo: a mayor humus, mayor CIC, por lo que habría menor cadmio en solución, lo que permite menor absorción.

Caso contrario, el cadmio se pierde del suelo o resulta inaccesible como consecuencia de la lixiviación y la extracción de los cultivos. Este metal también reacciona con los minerales o elementos del suelo, especialmente bajo condiciones de los suelos calcáreos.

#### **2.4.3 Fuentes de contaminación del cadmio**

La contaminación ambiental por cadmio ha aumentado como consecuencia del incremento de la actividad industrial que ha tenido lugar a finales del siglo XX y principios del siglo XXI, afectando de forma progresiva a los diferentes ecosistemas (Pinto et al., 2003). Entre los factores antropogénicos de contaminación por este metal (Cd), caben destacar los siguientes:

a) Emisiones atmosféricas.- Se originan a partir de las minas metalúrgicas, ya que el cadmio se extrae como subproducto del plomo, zinc, cobre y otros metales. También se originan por las incineradoras municipales, emisiones industriales procedentes de la producción de pigmentos para cristales, anticorrosivos, baterías de níquel/cadmio e insecticidas (McLaughlin y Singh, 1999).

b) Depósitos directos.- Otra fuente la constituyen los lodos procedentes de aguas residuales que se utilizan en agricultura (Alloway y Steinnes, 1999).

c) Los fertilizantes.- El uso de fertilizantes fosfatados es la principal fuente de contaminación de cadmio en suelos agrícolas. Los que son producidos a partir de la roca fosfórica constituyen la mayor entrada agrícola de este metal al suelo. Los fertilizantes fosfatados constituyen más del 50% de la entrada total de Cd en los suelos (De Meeús et al., 2002).

d) Los contaminación accidental.- Ocurre eventualmente debido a la contaminación de tierras por procesos industriales, residuos de la minería y corrosión de estructuras galvanizadas (Aguilar et al., 2003).

#### **2.4.4 Los fertilizantes y el cadmio**

La roca fosfórica y por lo tanto los fertilizantes fosfatados, contienen pequeñísimas cantidades de cadmio. Existe preocupación de que la utilización de fertilizantes fosfatados aumentaría lentamente el contenido de Cd en la tierra cultivable y que esto pudiera dar

lugar, con el tiempo, a que exista un nivel que exceda los niveles aceptables en los productos agrícolas.

Con la utilización actual de fertilizantes, se precisarán varios cientos de años para que los suelos cultivables se aproximen a los límites propuestos para el contenido de cadmio. Sin embargo, el aumento lento del contenido de Cd en el suelo, no es deseable. Actualmente, la única forma de fabricar fertilizantes con un bajo contenido de este metal es la de utilizar rocas con un bajo contenido del mismo, lo cual excluiría los importantes recursos de la roca fosfórica y llevaría consigo a que la disponibilidad de las materias primas fuese muy difícil.

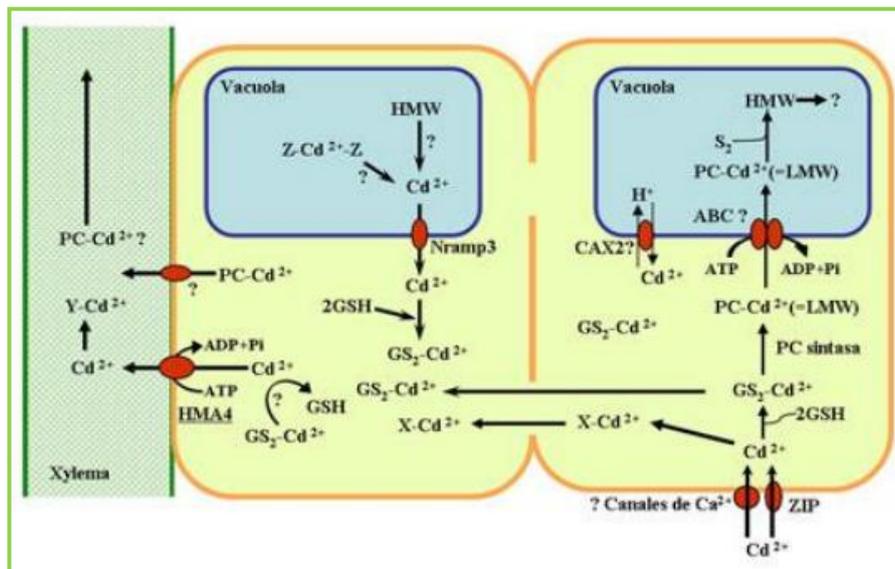
La industria de los fertilizantes está desarrollando procesos para eliminar el cadmio de manera que en el futuro puedan obtenerse fertilizantes con bajos niveles de este elemento en todos los recursos de rocas.

Si bien el empleo actual de fertilizantes no presenta ningún peligro inmediato, el desarrollo de procesos para la eliminación del cadmio debe ser objeto de prioridad, ya que en los últimos años la presencia de Cd en los suelos y el riesgo de ingreso de este elemento a la cadena alimenticia, ha generado mundialmente una preocupación creciente, debido al efecto tóxico de este elemento en humanos y animales (McLaughlin y Singh, 1999).

#### **2.4.5 Ingreso, transporte y acumulación del cadmio en plantas**

Se asume que no existen mecanismos de entrada específicos para el cadmio por ser un metal no esencial. Entre las proteínas responsables de la entrada de cadmio a la célula cabe destacar el transportador específico de calcio LCT1 (Clemens et al., 1998), y la proteína IRTI, perteneciente a la familia de transportadores de Zn y Fe (ZIP) (Guerinot, 2000). Otra familia de transportadores implicados es la Nramp, localizada en la membrana de la vacuola, por lo que probablemente tenga una función en la movilización del metal y no en el ingreso del mismo a la raíz (Thomine et al., 2000). Una vez dentro de la célula, el cadmio puede coordinarse con ligandos de azufre como glutatión (GSH) o fitoquelatinas (PCs) y ácidos orgánicos como el citrato (Clemens, 2006). Otras posibles moléculas responsables de la quelación del cadmio son pequeñas proteínas ricas en cisteína denominadas metalotioneínas (MTs). De esta forma, los complejos Cd-ligando pueden ser transportados al interior de la vacuola o a otras células (Shah y Nongkynrh, 2007).

En la planta, el cadmio se acumula preferentemente en la raíz secuestrado en la vacuola de las células, y solo una pequeña parte es transportada a la parte aérea de la planta concentrándose en orden decreciente en tallos, hojas, frutos y semillas (Chan y Hale, 2004). En células de levadura se ha demostrado que el cadmio ingresa en la vacuola unido a fitoquelatinas (PCs) a través de un transportador de tipo ABC (Ortiz et al., 1995). Otro posible mecanismo de entrada del cadmio en la vacuola es mediante un cotransportador de  $\text{Cd}^{2+}/\text{H}^+$  ubicado en la membrana de la misma (Salt y Wagner, 1993). Los transportadores de cationes CAX, implicados en el transporte de calcio a la vacuola, también transportan otros metales como el cadmio (Park et al., 2005). Una vez en la raíz, el cadmio puede pasar al xilema a través del apoplasto y/o a través del simplasto formando complejos (Clemens et al., 2002). Se muestra un esquema (Figura 2) del ingreso del cadmio a través de las células de la raíz, hasta llegar al xilema.



FUENTE: Clemens, 2006.

**Figura 2: Mecanismos de ingreso, secuestro y traslocación del Cd en raíces.**

La absorción por medio de las raíces es la ruta más importante para el ingreso de los metales pesados a la planta, y hay tres mecanismos distintos por los cuales se puede dar el movimiento de los iones contaminantes:

- Intercepción radicular, al ir aumentando el sistema radicular de una planta se va incrementando su volumen radicular y por ello se intercepta un volumen cada vez

mayor de solución suelo. De esta forma, la raíz entra en un contacto más íntimo con los iones que están unidos por cargas electrostáticas a las arcillas o a la materia orgánica. Este mecanismo tiene una mayor importancia para nutrientes de baja actividad iónica, es decir para aquellos nutrientes que son menos solubles en agua.

- Flujo de masas, el cual consiste en el movimiento del agua y de los nutrientes de la solución suelo a la raíz. Este proceso se debe a la pérdida de agua por la transpiración de la planta, lo cual crea una fuerza de succión por la diferencia de presión de agua entre el interior y exterior de la planta.
- Difusión, proceso espontáneo por el que ocurre un movimiento de los iones por un gradiente de potencial químico de una solución de mayor concentración a una menor concentración. Este mecanismo es importante para iones de alta energía.

#### **2.4.6 Toxicidad del cadmio en plantas**

Las plantas no tienen mecanismos para excretar cadmio, éstas lo absorben y retienen en sus tejidos. De esta manera, el cadmio se acumula preferentemente en la raíz, secuestrado en la vacuola de las células, y solo una pequeña parte es transportada a la parte aérea de la planta concentrándose en orden decreciente en tallos, hojas, frutos y semillas (Chan y Hale, 2004).

En las plantas, el cadmio altera los procesos metabólicos normales, disminuye la tasa de fotosíntesis y la transpiración, y aumenta la frecuencia respiratoria, ya que las plantas expuestas a suelos contaminados con cadmio presentan modificaciones en la apertura estomática (Sandalo et al., 2001). En general el Cd interfiere en la entrada, transporte y utilización de elementos esenciales (N-NO<sub>3</sub>, Ca, Mg, P y K) y del agua, provocando desequilibrios nutricionales e hídricos en la planta (Singh y Tewari, 2003). El Cd inhibe específicamente la actividad de la nitrato reductasa en tallos (Gouia et al., 2000).

Por otro lado, es importante destacar el tipo de cultivo que se esté manejando, ya que no todas las plantas acumulan cadmio en igual medida (Prince et al., 2002). Algunas especies son más sensibles al cadmio como la espinaca, soya, lechuga; mientras que otras como el tomate y la col, son completamente resistentes.

El conjunto de las respuestas visibles forman lo que denominamos síntomas de estrés. Los síntomas causados por el exceso de metales en las plantas son: clorosis y achaparramiento.

Aún pequeñas concentraciones de cadmio en el suelo conducen a cuadros de lesiones muy extendidas, como por ejemplo, el acortamiento del eje caulinar y un rayado de color amarillo intenso en las hojas más viejas. Uno de los síntomas más extendidos de la toxicidad por cadmio es la clorosis producida por una deficiencia de hierro (Benavides et al., 2005), fosfatos, por la reducción del transporte de Mn, por una interacción de los metales con el Fe foliar, o inclusive por la reducción de clorofila.

El cadmio también provoca marchitez y necrosis porque este metal a altas concentraciones inhibe la fotosíntesis y la fijación de bióxido de carbono (Bodilla, 1989).

El primer efecto directo del cadmio, cuando alcanza concentraciones tóxicas en las plantas, es un cambio en el balance iónico normal de la célula. Este desbalance se puede dar en la superficie celular, al reemplazar el Cd al ión  $\text{Ca}^{+2}$ . Ante la posibilidad de estos desórdenes fisiológicos, todas las plantas han desarrollado una serie de respuestas para tolerar y, por tanto, sobrevivir hasta un cierto límite de concentración tóxica de cadmio. La primera respuesta, es un cambio hormonal por el cual se induce principalmente la síntesis de ácido abscísico (ABA) y de etileno, junto con ellos se da la alteración en los niveles de otros reguladores de crecimiento. Producto de estas hormonas vegetales se inducen otras respuestas como son: la inducción del crecimiento caulinar, la senescencia foliar, la abscisión, el cierre de estomas, alteración en la morfología foliar, el ajuste osmótico, las alteraciones en el patrón del crecimiento de las raíces, etc. (Romero-Puertas, 2002).

El tratamiento con cadmio produce reducción de la actividad ATPasa de la membrana plasmática (Astolfi et al., 2005), alteraciones en la funcionalidad de la membrana plasmática (Sandalió et al., 2001) y desequilibrios en el metabolismo del cloroplasto, inhibiendo la síntesis de clorofila y reduciendo la actividad de enzimas implicadas en la fijación de  $\text{CO}_2$  (Maksymiec et al., 2007).

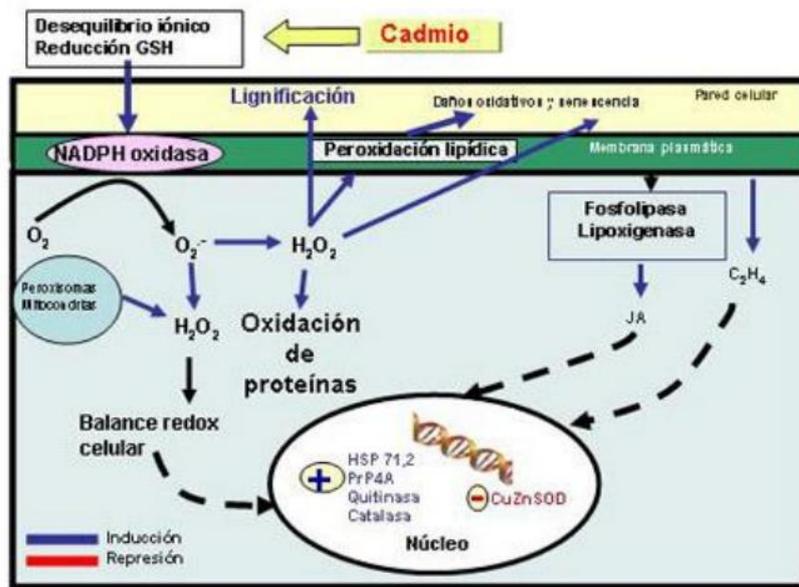
Los cationes metálicos  $\text{Cd}^{2+}$  y  $\text{Pb}^{2+}$  no experimentan cambios redox y por lo tanto, a diferencia del  $\text{Fe}^{2+}$  o  $\text{Cu}^{2+}$ , no actúan directamente en la generación de especies reactivas de oxígenos (ROS). Sin embargo, pueden actuar como prooxidantes a través de la reducción del contenido de GSH, necesario para la síntesis de PCs, disminuyendo así su disponibilidad para la defensa antioxidante (Pinto et al., 2003). El estrés oxidativo producido por el cadmio se manifiesta por daños oxidativos a membranas tales como peroxidación lipídica (Sandalió et al., 2001), y también se han descrito daños oxidativos a proteínas por formación de grupos carbonilo. Las actividades de las enzimas antioxidantes

como superóxido dismutasa (SOD), glutathion reductasa (GR), ascorbato peroxidasa (APX), peroxidasas (POD) y la catalasa (CAT), encargadas de la defensa celular frente a las ROS, experimentan reducciones o incremento de su actividad en función de la concentración de cadmio incluida en el medio de crecimiento, la duración del tratamiento, el tipo de tejido y la especie vegetal de que se trate (Sandalo et al., 2001; Benavides et al., 2005).

En los últimos años se ha incrementado el interés por el estudio de los mecanismos íntimos implicados en la producción de ROS en respuesta al Cd. Como consecuencia de ello, se ha demostrado la producción de ROS en distintos compartimentos celulares (membrana plasmática, mitocondrias y peroxisomas) siendo la NADPH oxidasa una de las principales fuentes de ROS (Garnier et al., 2006). Últimamente también se ha prestado atención especial al estudio de la regulación de la producción de ROS y la síntesis de antioxidantes, así como la implicación de hormonas como el ácido jasmónico y el etileno, y de moléculas como el NO.

Se muestra un esquema que resume la respuesta al cadmio de la planta en la Figura 3. Según este esquema, el Cd podría inducir la NADPH oxidasa de membrana a través de ROS, donde se formarían  $O_2^-$  y  $H_2O_2$  y podrían intervenir en la lignificación de la pared celular que es una barrera de entrada del metal (Sanità di Topi y Gabbrielli, 1999). Las ROS pueden ser eliminadas por los sistemas antioxidantes pero cuando la intensidad y duración del tratamiento superan la barrera antioxidante, se produce un exceso de ROS que se traduce en daños oxidativos a membranas y proteínas. (Stohs y Bagchi, 1995; Gallego et al, 1996; Benavides et al., 2005; Gratañ et al., 2005). Los daños a membranas van acompañados de un incremento en la síntesis de etileno y jasmónico (JA), que junto con el  $H_2O_2$  van a regular la expresión de un gran número de proteínas de defensa (HSPs, quitinasa o antioxidantes, entre otras).

Recientemente se ha demostrado un importante papel regulador del NO en distintos procesos de desarrollo en vegetales (del Río et al., 2002). El papel de esta molécula está siendo estudiado y parece ser que el cadmio reduce considerablemente la acumulación de NO en tratamientos largos, si bien no se conocen los mecanismos implicados en este proceso (Rodríguez-Serrano et al., 2006).



FUENTE: Sanitá di Topi y Gabrielli, 1999.

**Figura 3: Esquema de la respuesta celular al cadmio.**

#### 2.4.7 Estrategias de tolerancia al cadmio

Evolutivamente las plantas han desarrollado distintas estrategias para evitar la toxicidad de metales pesados. En general, la tolerancia a metales viene determinada por la reducción del transporte del mismo al interior de la célula y/o una mayor capacidad para secuestrar estos metales.

La raíz constituye una de las principales barreras de defensa mediante la inmovilización del cadmio por pectinas de la pared celular. Los carbohidratos extracelulares (mucílago y calosa) de la raíz también pueden intervenir en la inmovilización del metal (Benavides et al., 2005).

La acumulación del metal en los tricomas de la superficie foliar también es un mecanismo de inmovilización y defensa celular (Salt et al., 1995). Otro mecanismo consiste en la reducción del transporte o aumento de la extrusión del cadmio por transportadores de cationes de la membrana plasmática (Thomine et al., 2000).

Una vez dentro de la célula, el cadmio u otros metales, pueden ser secuestrados por ácidos orgánicos, aminoácidos, fitoquelatinas y metalotioneínas, y posteriormente compartimentalizados en la vacuola para prevenir su toxicidad. Las fitoquelatinas

constituyen uno de los principales mecanismos de defensa frente a metales pesados. Su síntesis tiene lugar a partir del glutatión y se induce en presencia de metales pesados (Clemens, 2006). Las plantas que sobre expresan la enzima fitoquelatina sintasa muestran una mayor tolerancia frente al cadmio (Pomponi et al., 2006).

Otras posibles moléculas responsables de la acumulación del cadmio son las metalotioneínas (MTs), pequeñas proteínas ricas en cisteína, las cuales en las plantas no son las principales responsables de la detoxificación del cadmio, pero sí en células animales (Hamer, 1986).

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. UBICACIÓN**

El experimento fue conducido en el Invernadero del Laboratorio de Fertilidad de Suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina, ubicada en el distrito de La Molina, provincia y departamento de Lima; entre febrero y junio del 2014.

La ubicación geográfica es la siguiente:

- Latitud: 12° 05' 06'' sur
- Longitud: 76° 57' 07'' oeste
- Altitud: 238 msnm

#### **3.2. MATERIALES EMPLEADOS**

##### **3.2.1.- Suelo:**

Se emplearon dos tipos de suelo. Uno fue de textura arenosa, y el otro franco-arenoso. Ambos fueron ligeramente alcalinos (pH 7.72 para el suelo franco-arenoso y pH 7.77 para el suelo arenoso), bajos en materia orgánica (0.04% en ambos suelos), bajos en P disponible (ambos) y el suelo franco-arenoso tuvo valores medio de K, mientras el suelo arenoso tuvo valores bajos. Para ambos tipos de suelos, no hubo salinidad.

**Cuadro 4: Análisis físico-mecánico y químico de los suelos usados.**

<b>Textura</b>	<b>Franco Arenosa</b>	<b>Arenosa</b>	<b>ANÁLISIS REALIZADO</b>
Arena %	62	100	Método del hidrómetro
Limo %	20	0	Método del hidrómetro
Arcilla %	18	0	Método del hidrómetro
M.O %	0.04	0.04	Método de Walkey y Black
CaCO <sub>3</sub> %	3.30	0.30	Método gaso-volumétrico
pH	7.72	7.77	Método del potenciómetro
P (ppm)	5.3	3.9	Método Olsen modificado
K (ppm)	106	76	Extracción con acetato de amonio
C.E. (dS/m)	1.38	0.61	Lectura del extracto de relación suelo-agua 1:1
C.I.C (cmol/Kg)	9.60	6.40	Saturación con acetato de amonio
Ca <sup>++</sup> (cmol/Kg)	5.90	5.06	Espectrofotometría de absorción atómica
Mg <sup>++</sup> (cmol/Kg)	2.70	0.62	Espectrofotometría de absorción atómica
K <sup>+</sup> (cmol/Kg)	0.33	0.17	Espectrofotometría de absorción atómica
Na <sup>+</sup> (cmol/Kg)	0.67	0.53	Espectrofotometría de absorción atómica

FUENTE: Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas, Plantas, Fertilizantes de la UNALM.

### **3.2.2.- Agua**

Se utilizó agua de pozo para el riego proveniente de la localidad de Huachipa cuya clasificación es C3-S1. Esto significa que su concentración de sales es elevada pero hay un bajo riesgo de sodificación.

El pH es ligeramente alcalino y los niveles de nitratos, cloruros y boro son bajos.

**Cuadro 5: Resultados del Análisis de agua.**

Muestra	Agua de Huachipa
CE	1.04 dS/m
Ca	6.94 me/l
Mg	1.26 me/l
Na	2.53 me/l
K	0.11 me/l
<b>SUMA DE CATIONES</b>	10.84
Nitratos	0.80
Carbonatos	0.00
Bicarbonatos	3.24
Sulfatos	3.48
Cloruros	2.70
<b>SUMA DE ANIONES</b>	10.22
Na	23.33%
RAS	1.24
Boro	0.30 ppm
Clasificación	C3S1

FUENTE: Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas, Plantas y Fertilizantes de la UNALM.

### **3.2.3.- Cultivo indicador**

La variedad empleada de maíz fue el híbrido PMX-5, obtenido por el Programa de Maíz de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Se eligió el maíz como cultivo indicador porque se puede desarrollar en una amplia variedad de suelos, es extractivo en nutrientes y por su velocidad de crecimiento y formación de materia seca, permitiéndose ver rápida y claramente los efectos de la fertilización y cadmio.

### 3.2.4.- Fertilizantes empleados

#### a.- Fosfato diamónico:

El fosfato diamónico (FDA) es un fertilizante complejo granulado con alto contenido de fósforo (18% de nitrógeno amoniacal y 46% de  $P_2O_5$ ). El nitrógeno favorece la absorción y disponibilidad del fósforo, elemento que en el suelo es mínimamente asimilable.

Los fosfatos amónicos tienen una reacción residual ácida, aunque inicialmente tienen una reacción alcalina, por lo que son adecuados para suelos neutros o alcalinos. El amonio presente en el Fosfato diamónico es una excelente fuente de nitrógeno que es convertido gradualmente en nitrato por las bacterias del suelo, resultando en una disminución ulterior del pH. Por lo tanto, el aumento en el pH del suelo alrededor de los gránulos del FDA es un efecto temporal. Este aumento inicial del pH alrededor del FDA puede influir en las reacciones del micro-sitio entre fosfatos y la materia orgánica del suelo.

El fosfato diamónico es ideal para los cultivos extensivos, debido a que su contenido de nitrógeno es alto, resultando bueno para los cultivos que requieren dicho nutriente en su etapa inicial. Es un producto con alta solubilidad en agua, lo que asegura una rápida respuesta a la fertilización.

Sus propiedades químicas son:

- Fórmula química:  $(NH_4)_2HPO_4$
- Contenido de N: 18%
- Contenido de  $P_2O_5$  : 46%
- Solubilidad en agua (20° C): 588 g/L
- pH solución: 7.5 a 8

El fosfato diamónico es altamente soluble y por lo tanto se disuelve rápidamente en el suelo para liberar fosfato y amonio disponible para las plantas. Una característica notable es su pH alcalino que se desarrolla alrededor de los gránulos en disolución.

Como la disolución de gránulos del fosfato diamónico libera amonio, el amoníaco volátil puede ser dañino para las plántulas y raíces de plantas cercanas. Este daño potencial es más común cuando el pH del suelo es superior a 7.

## **b.- Roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico**

La roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico (roca fosfórica ASS) es un fertilizante sólido-granulado con alto contenido de fósforo, bajo la forma de superfosfato simple, rico en calcio (Ca), azufre (S) y enriquecido con microelementos como: zinc, manganeso, cobre, hierro, magnesio, boro, etc.

El fósforo (P) contenido en este fertilizante es aplicado al suelo, en el distal radicular y es asimilado por las plantas en forma iónica que se encuentra en la solución suelo.

Se sugiere aplicarlo con el abonamiento de fondo, conjuntamente con la fuente de nitrógeno (N) y potasio (K) o en forma fraccionada según las prácticas culturales de los cultivos tratados.

Los ingredientes activos de este fertilizante son:

• Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	20.0 %
• Sulfato de calcio (CaSO <sub>4</sub> )	50.0 %
• Sulfato de hierro (FeSO <sub>4</sub> )	1.0%
• Sulfato de magnesio (MgSO <sub>4</sub> )	2.0%
• Sulfato de zinc (ZnSO <sub>4</sub> )	0.4%
• Sulfato de manganeso (MnSO <sub>4</sub> )	0.6%
• Sulfato de cobre (CuSO <sub>4</sub> )	0.2%
• Boro	0.1%

Mientras que las características Físico- Químicas son:

• Estado físico	Sólido granulado
• Color	Blanco arena
• Olor	Característico

- pH 3.4 +/- 0.1 de la suspensión
- Inflamabilidad No inflamable
- Explosividad No explosivo
- Corrosividad No corrosivo
- Estabilidad 5 años

**c.- Cadmio en los fertilizantes usados**

Para obtener el valor de cadmio en los fertilizantes puros, estos fueron identificados y llevados a ser analizados en el laboratorio.

Para obtener el valor de cadmio en los fertilizantes diluidos, se pesaron 10 gramos de cada uno de estos y se agitaron por 30 minutos en 100 ml de agua, con la ayuda de un agitador mecánico para facilitar la dilución. Luego, esta mezcla fue analizada en el laboratorio.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

**Cuadro 6: Resultados de las concentraciones de Cd (ppm) en los dos fertilizantes utilizados.**

CLAVES	Cd (ppm)	
	Fertilizantes puros	Fertilizantes diluidos
Roca fosfórica acid. ac. sulf.	5.83	0.43
Fosfato diamónico	10.06	1.53

Se puede observar que el fertilizante que posee más cadmio en su composición es el fosfato diamónico.

### **3.2.5. Implementos y Equipos**

- Mesas de invernadero y mallas metálicas
- 42 macetas de plástico de 4 Kg de capacidad
- Suelo arenoso procedente de Cieneguilla
- Suelo franco arenoso procedente de la UNALM
- Platos de plástico
- Balde para regar
- Vaso de precipitado para regar
- Cinta adhesiva y plumones
- Libreta de campo
- Cámara fotográfica
- Bolsa de papel kraft
- Pipetas, fiolas, probetas y vasos de precipitado
- Balanza de platillos y analítica
- Estufa
- Fertilizantes fosfatados: fosfato diamónico y roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico.
- Semillas de maíz híbrido PMX-5.

### **3.3.- Metodología**

La investigación se realizó mediante una prueba biológica bajo condiciones de invernadero.

- Factores en estudio:
  - Fuentes de fertilizantes fosfatados: fosfato diamónico y roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico.
  - Dosis: 200 ppm, 100 ppm y 50 ppm.

Estas dos fuentes con tres dosis fueron probadas en dos tipos de suelo (arenoso y franco arenoso). Para cada tipo de suelo, se agregó un tratamiento testigo, el cual no recibía fuente ni dosis alguna.

Al combinar se tiene 6 tratamientos más un testigo, resultando 7 tratamientos, los cuales se aplicaron a cada tipo de suelo (ver Cuadro 7 y 8).

Cada tratamiento tuvo 3 repeticiones.

Posteriormente se realizará un análisis combinado de los dos experimentos conducidos previa prueba homogeneidad de variancias de los errores.

Se determinó el efecto en la acumulación de materia seca y extracción total de cadmio en plantas de maíz.

**Cuadro 7: Fuentes de fósforo, dosis de fósforo, en suelo franco arenoso.**

Nº	TRATAMIENTOS	NITRÓGENO* (ppm)	FÓSFORO (ppm)	POTASIO** (ppm)
1	FDA	200	200	200
2	FDA	200	100	200
3	FDA	200	50	200
4	Roca Fosfórica AAS	200	200	200
5	Roca Fosfórica AAS	200	100	200
6	Roca Fosfórica AAS	200	50	200
7	Sin P	200	0	200

**Cuadro 8: Fuentes de fósforo, dosis de fósforo, en suelo arenoso.**

Nº	TRATAMIENTOS	NITRÓGENO* (ppm)	FÓSFORO (ppm)	POTASIO** (ppm)
1	FDA	200	200	200
2	FDA	200	100	200
3	FDA	200	50	200
4	Roca Fosfórica AAS	200	200	200
5	Roca Fosfórica AAS	200	100	200
6	Roca Fosfórica AAS	200	50	200
7	Sin P	200	0	200

Donde:

\*Urea (46% de N)

\*\*Cloruro de potasio (60% K<sub>2</sub>O)

### **a) Preparación del suelo**

Se inició la instalación parchando los agujeros de drenaje.

Los dos tipos de suelo se pusieron a secar al ambiente por 4 días. Mientras las dos muestras de suelo se secaban, también se iban removiendo frecuentemente con un rastrillo para asegurar uniformidad.

Luego fueron tamizados, por separado, con una malla de 2mm, y se llenaron 21 macetas con 3.5 kg de suelo arenoso y otras 21 macetas con 3.5 kg de suelo franco-arenoso. Las 42 macetas luego fueron dispuestas en las mesas con sus respectivos platos.

### **b) Aplicación de tratamientos**

Para cada tratamiento se pesó el valor correspondiente de acuerdo a la fuente de fósforo (fosfato diamónico y roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico). Estos materiales fueron molidos para ser aplicados según lo planificado en el proyecto. Fueron molidos y luego disueltos.

### **c) Siembra**

Las semillas fueron proporcionadas por el programa de maíz de la UNALM y corresponden al híbrido PMX-5. Las semillas fueron remojadas con un día de anticipación a la siembra.

La siembra del maíz se realizó en forma directa colocando 10 semillas por maceta. A los 5 días se dejaron solo 4 plantas/maceta para cada tratamiento en sus 3 repeticiones (escogiendo las más vigorosas y mejor distribuidas).

Se trató de mantener en capacidad de campo cada una de las macetas, para ello se pesaron las macetas y se le añadió el agua necesaria para llegar al peso en capacidad de campo. Los riegos se efectuaron a 80% de su capacidad de campo con agua proveniente de río (conexión directa con el Laboratorio de Fertilidad de Suelos de la UNA La Molina).

La germinación fue del 100%.

#### **d) Fertilización**

Se aplicó el primer fraccionamiento de los fertilizantes sólidos (14-02-2014), los cuales fueron molidos y luego disueltos.

A los 28 días de la primera aplicación (primera fracción) se aplicó la segunda fertilización (segunda aplicación).

Las dos fertilizaciones se aplicaron disueltas con agua destilada, dirigidos a los bordes de los sustratos usados.

#### **3.3.2. Cosecha**

La cosecha se efectuó al mes de la segunda fertilización. Se realizó tanto de la parte aérea como de la radicular.

Hay que resaltar que al haber 4 plantas por maceta, la competencia por nutrientes es mayor que en campo definitivo, donde hay de 2 a 3 plantas por golpe.

Se procedió primero a cosechar la parte foliar trozándola en pequeños pedazos que fueron colocados en bolsas de papel y pesándolas inmediatamente para obtener el peso fresco. Las muestras fueron puestas en bolsas de papel Kraft, y luego de ser identificadas se llevaron a estufa por tres días a 70°C.

Luego, las raíces se separaron del suelo con ayuda de un tamiz, lavándolas con el agua potable para después obtener el peso fresco.

Las muestras lavadas se colocaron sobre papel secante para que escurrieran, luego se colocaron a la estufa a 70° C en bolsas de papel kraft hasta que alcanzaron un peso constante.

Posteriormente, las muestras secas (tanto de la parte aérea como de la radicular) fueron molidas (separadamente, primero la parte aérea, luego la radicular) en un molino modelo Wiley Mill, usando un tamiz N° 40.

Con las muestras molidas, se tuvo la base para poder realizar el análisis químico.

### **3.3.3. Análisis químico**

Se evaluó el cadmio al final del ensayo, con la finalidad de determinar en qué parte de la planta (foliar o radicular) se acumula este elemento pesado en mayor concentración y qué tratamientos fueron los que más lo extrajeron. Para analizar la concentración de cadmio en las plantas, se utilizó el método de digestión por vía húmeda, con el ataque de la mezcla en los ácidos nítrico y perclórico.

Para hallar nitrógeno, se pesó 0.10 g de cada muestra seca y molida. Se procede a digerir y luego a destilarse. El gas hallado se asocia con la cantidad de nitrógeno de nuestra muestra (método Kjeldahl).

Asimismo, para hallar el fósforo se utilizó el método de Olsen (espectrocolorimetría) y para el potasio se usó fotometría.

### **3.3.4. Segunda campaña**

Se repite el experimento con los mismos procedimientos a excepción de la fertilización fosfatada, pues esta se omite.

### **3.3.5. Cronología del experimento**

- 08-02-2014 Limpieza y acondicionamiento de las macetas
- 12-02-2014 Llenado de las macetas con sustrato (3.5kg de suelo/maceta)
- 12-02-2014 Identificación de las macetas con cinta adhesiva y plumón
- 14-02-2014 Primera fertilización
- 22-02-2014 Siembra de maíz
- 14-03-2014 Segunda fertilización
- 09-04-2014 Cosecha. La parte aérea se limpió y partió en trozos y se colocó en bolsas de papel. Luego se obtuvo el peso fresco de la parte aérea

- 15-04-2014 Volteado de las macetas para dejar escurrir la arena y proceder a lavar las raíces. Luego se las dejaron secar al sol
- 15-04-2014 Obtención de peso seco de parte aérea
- 16-04-2014 Obtención del peso fresco de la parte radicular
- 22-04-2014 Obtención de peso seco de parte radicular
- 22-04-2014 Siembra de segunda campaña
- 23-04-2014 Molienda de muestras para proceder a la extracción de nitrógeno, fósforo, potasio y cadmio en el Laboratorio de Suelos y Plantas.
- 23-05-2014 Fertilización de la segunda campaña
- 04-06-14 Cosecha de la segunda campaña

### 3.4. DISEÑO ESTADÍSTICO

El diseño estadístico usado en este trabajo de investigación fue un Diseño Completamente al Azar (DCA) con arreglo factorial 2x3, más un tratamiento adicional con 3 unidades experimentales por tratamiento para suelo arenoso y de igual manera se hizo para un suelo franco arenoso.

Es decir, se realizaron dos ensayos, uno para cada tipo de suelo. Por cada tipo de suelo se trabajó con 7 tratamientos, resultados del uso de dos fuentes fosfatadas, 3 dosis usadas y un tratamiento control.

El modelo aditivo lineal para cada experimento fue:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \alpha_j + (\tau\alpha)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

En donde:

i = 1,2,...,a (fuente de fertilización)

j = 1,2,...,b (dosis de fertilización)

k = 1,2,...,r (repeticiones)

Posteriormente se hizo un análisis combinado con los dos experimentos, previa prueba de homogeneidad de variancia de los errores.

**Modelo Aditivo Lineal del análisis combinado:**

$$Y_{hijk} = \mu + \beta_h + t_i + \alpha_j + (\beta t)_{hi} + (\beta \alpha)_{hj} + (t \alpha)_{ij} + (\beta t \alpha)_{hij} + \varepsilon_{hijk}$$

Donde:

**h:** 1,2,...,s (tipo de suelo)

**i:** 1,2,...,a (fuente de fertilización)

**j:** 1,2,...,b (dosis de fertilización)

**k:** 1,2,...,r (repeticiones)

**Y<sub>hijk</sub>:** es el valor observado por el efecto del h-ésimo tipo de suelo, i-ésima fuente de fertilización y j-ésima dosis de fertilización, en la k-ésima repetición.

**μ:** es el efecto de la media general.

**β<sub>h</sub>:** es el efecto del h-ésimo tipo de suelo.

**t<sub>i</sub>:** es el efecto de la i-ésima fuente de fertilización.

**α<sub>j</sub>:** es el efecto de la j-ésima dosis de fertilización.

**(βt)<sub>hi</sub> :** es el efecto de la interacción en el h-ésimo tipo de suelo con la i-ésima fuente de fertilización.

**(βα)<sub>hj</sub>:** es el efecto de la interacción en el h-ésimo tipo de suelo con la j-ésima dosis de fertilización.

**(tα)<sub>ij</sub>:** es el efecto de la interacción en la i-ésima fuente de fertilización con la j-ésima dosis de fertilización.

**(βtα)<sub>hij</sub>:** es el efecto de la interacción en el h-ésimo tipo de suelo con la i-ésima fuente de fertilización y la j-ésima dosis de fertilización.

$\epsilon_{hijk}$ : es el efecto del error experimental en el h-ésimo tipo de suelo, i-ésima fuente de fertilización y j-ésima dosis de fertilización, en la k-ésima repetición.

**Cuadro 9: Análisis de variancia individual para cada experimento**

Fuente de Variación	GL
Tratamientos	$t-1 = 6$
Factorial	$ab-1 = 5$
Fuente	$a-1 = 1$
Dosis	$b-1 = 2$
Fuente x Dosis	$(a-1)(b-1) = 2$
Factorial vs testigo	1
Error	$t(r-1) = 14$
Total	$rt-1 = 20$

**Cuadro 10: Análisis de variancia combinado**

Fuente de Variación	GL
Tratamientos	$t-1 = 13$
Factorial	$abc-1 = 11$
Suelo	$s-1 = 1$
Fuente	$a-1 = 1$
Dosis	$b-1 = 2$
Suelo x Dosis	$(s-1)(b-1) = 2$
Suelo x Fuente	$(s-1)(a-1) = 1$
Fuente x Dosis	$(a-1)(b-1) = 2$
Suelo x Fuente x Dosis	$(s-1)(a-1)(b-1) = 2$
Testigo	$c-1 = 1$
Factorial vs testigo	1
Error	$t(r-1) = 28$
Total	$rt-1 = 41$

En el ensayo se aplicó un análisis de varianza para un diseño completo al azar (DCA). Con el arreglo factorial de  $1 \times 2 \times 1$  incluyendo dos testigos adicionales. Para la comparación de medias de tratamientos se empleó una prueba de Tukey a nivel de P valor=0.05. Los datos de la investigación fueron analizados con el programa SAS (Statistical Analysis System) versión 9.4.

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

### **4.1. ANÁLISIS DE MATERIA SECA EN PLANTAS DE MAÍZ**

A continuación se muestran los resultados del efecto observado de la aplicación de fertilizantes fosfatados con presencia de cadmio y el efecto de los dos tipos de suelo sobre la producción de materia seca.

#### **4.1.1 Materia seca de las plantas de maíz**

En el anexo 12 se observa el análisis de varianza de la materia seca foliar (g/pl.) en plantas de maíz con diferentes dosis y fuentes de fósforo y dos tipos de suelo, en donde se observa en su fuente de variación una alta significación estadística para suelo, fuente, dosis y las interacciones de primer y segundo orden, siendo necesario realizar el análisis de efectos simples simples. El coeficiente de variabilidad fue de 6.5 %.

Consecuentemente, se analizaron los resultados de los efectos simples simples de la materia seca foliar (g/pl.) de los tratamientos aplicados, y como resultado se obtuvo que usando fosfato diamónico en la arena (Cuadro 13), la mayor dosis de 200 ppm fue la que tuvo los mayores rendimientos estadísticamente, seguidos por las dosis de 100 ppm y 50 ppm, los cuales no tuvieron diferencia estadística entre ellos. Este resultado fue similar cuando se aplicó fosfato diamónico en suelo franco arenoso (Cuadro 14), en el cual la dosis de 200 ppm fue la que tuvo mayores rendimientos, seguido por la dosis de 100 ppm y finalmente 50 ppm, donde las tres dosis tuvieron diferencia estadística. Por otro lado, cuando se usó roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico en suelo arenoso (Cuadro 15), los mejores rendimientos también se obtuvieron con la dosis de 200 ppm, seguida sin diferencias estadísticas por las dosis de 100 ppm y 50 ppm. De la misma manera, cuando se usó roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico en suelo franco arenoso (Cuadro 16), los mejores rendimientos nuevamente se obtuvieron con 200 ppm, seguidos por 100 ppm y 50 ppm, donde estas dos últimas dosis no tuvieron diferencia estadística.

**Cuadro 11: Dosis de fósforo en la interacción fosfato diamónico x suelo arenoso del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.**

DOSIS	FUENTE	SUELO	MEDIA	
50	FDA	Arena	12.44	B
100	FDA	Arena	12.75	B
200	FDA	Arena	23.13	A

**Cuadro 12: Dosis de fósforo en la interacción fosfato diamónico x suelo franco arenoso del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.**

DOSIS	FUENTE	SUELO	MEDIA	
50	FDA	FrancoA	9.88	C
100	FDA	FrancoA	11.69	B
200	FDA	FrancoA	22.31	A

**Cuadro 13: Dosis de fósforo en la interacción roca fosfórica x suelo arenoso del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.**

DOSIS	FUENTE	SUELO	MEDIA	
50	RocaF	Arena	6.97	B
100	RocaF	Arena	7.91	B
200	RocaF	Arena	15.86	A

**Cuadro 14: Dosis de fósforo en la interacción roca fosfórica x suelo franco arenoso del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.**

DOSIS	FUENTE	SUELO	MEDIA	
50	RocaF	FrancoA	5.65	B
100	RocaF	FrancoA	5.72	B
200	RocaF	FrancoA	7.50	A

De la misma manera, los resultados de los efectos simples de la materia seca foliar (g/pl.) de los tratamientos a analizar, es decir los efectos de los niveles de fósforo aplicados, fueron altamente significativos (ver Anexo 13).

El maíz es una planta C4, es decir tiene una alta eficiencia fotosintética, que responde significativamente a los elementos sintéticos aplicados, de allí que las aplicaciones fosfatadas permitan un mayor rendimiento en materia seca.

#### 4.1.2 Efecto de las fuentes de fósforo aplicados en el peso de las plantas de maíz

Según el análisis de variancia de la materia seca foliar (g/pl.) en plantas de maíz con distintas fuentes de fósforo y dosis aplicadas en los dos tipos de suelo, la cual fue explicada anteriormente, el resultado fue muy significativo para todas las fuentes de variación (ver Anexo 12).

Los efectos simples de la materia seca foliar (g/pl.) de los tratamientos aplicados, dan como resultado que, los mejores rendimientos se obtuvieron cuando se usó el fosfato diamónico en 200 ppm tanto en el suelo arenoso como en el franco arenoso. El fosfato diamónico también tuvo los mejores resultados cuando se usó 100 ppm en los dos tipos de suelo, repitiéndose los mejores efectos con el fosfato diamónico para 50 ppm en suelo arenoso y suelo franco arenoso.

**Cuadro 15: Fuente en la interacción dosis 50 ppm x suelo arenoso del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.**

FUENTE	DOSIS	SUELO	MEDIA	
FDA	50	Arena	12.44	A
RocaF	50	Arena	6.97	B

**Cuadro 16: Fuente en la interacción dosis 50 ppm x suelo franco arenoso del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.**

FUENTE	DOSIS	SUELO	MEDIA	
FDA	50	FrancoA	9.88	A
RocaF	50	FrancoA	5.65	B

**Cuadro 17: Fuente en la interacción dosis 100 ppm x suelo arenoso del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.**

FUENTE	DOSIS	SUELO	MEDIA	
FDA	100	Arena	12.75	A
RocaF	100	Arena	7.91	B

**Cuadro 18: Fuente en la interacción dosis 100 ppm x suelo franco arenoso del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.**

FUENTE	DOSIS	SUELO	MEDIA	
FDA	100	FrancoA	11.69	A
RocaF	100	FrancoA	5.72	B

**Cuadro 19: Fuente en la interacción dosis 200 ppm x suelo arenoso del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.**

FUENTE	DOSIS	SUELO	MEDIA	
FDA	200	Arena	23.13	A
RocaF	200	Arena	15.86	B

**Cuadro 20: Fuente en la interacción dosis 200 ppm x suelo franco arenoso del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.**

FUENTE	DOSIS	SUELO	MEDIA	
FDA	200	FrancoA	22.31	A
RocaF	200	FrancoA	7.5	B

Asimismo, los resultados de los efectos simples de la materia seca foliar (g/pl.) de los tratamientos estudiados dentro de los efectos de las fuentes de fósforo aplicadas fueron altamente significativos (ver Anexo 15).

Por lo tanto, el empleo de la fuente fosfato diamónico presentó mayor rendimiento estadístico (Tukey 0.05) en materia seca.

El fosfato diamónico es un fertilizante compuesto que presenta amonio, el mismo que al ingresar al interior de la planta libera  $H^+$  (acidificación), condición que favorece la mayor solubilidad del fósforo.

Además, la composición química del fosfato diamónico presenta mayor contenido de fósforo (46%  $P_2O_5$ ) comparándolo con la roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico (20%  $P_2O_5$ ). Del mismo modo, el FDA también está compuesto de amonio (16%), el cual estimula el crecimiento vegetativo de los cultivos en las primeras fases de desarrollo. La roca fosfórica está enriquecida con calcio y azufre, y también cuenta con micronutrientes adicionales como el boro, zinc, magnesio y manganeso, pero estos generalmente no se reflejan en las primeras semanas de desarrollo de la planta.

El fósforo mejoró la respuesta en acumulación de materia seca, pese a la aplicación de cadmio como elemento acompañante dentro de los fertilizantes fosfatados. Su baja concentración no fue determinante en el crecimiento de las plantas de maíz. La aplicación de fósforo mejoró los niveles disponibles en la solución suelo, siendo así absorbido por las plantas de maíz, mejorando su desarrollo y acumulación de materia seca.

Podemos indicar que el fósforo dentro de la planta tiene varias funciones, entre ellas la transferencia de energía, estructural y colector de procesos enzimáticos por lo cual su adecuada provisión mejorará el desarrollo de la planta. En el presente caso, debido a que el FDA tiene una supuesta mayor solubilidad, presentó el mayor desarrollo de las plantas de maíz, así también su presencia de cadmio es menor que en las otras fuentes.

#### **4.1.3 Efecto de los tipos de suelo en la materia seca de las plantas de maíz**

En el análisis de variancia de la materia seca foliar (g/pl.) en plantas de maíz con distintas fuentes de fósforo y dosis aplicadas en los dos tipos de suelo, el resultado fue muy significativo para todas las fuentes de variación (ver Anexo 12).

Referente a los efectos simples de la materia seca foliar (g/pl.) de los tratamientos aplicados, el suelo arenoso tuvo mejores rendimientos que el suelo franco arenoso cuando se usó la mayor dosis aplicando roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico (Cuadro 26). El mismo escenario se repite cuando se usa 100 ppm en forma de roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico, donde el suelo arenoso presenta mejores resultados que el franco

arenoso (Cuadro 25). Esto también se refleja cuando se aplica 50 ppm usando como fuente la roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico en suelo arenoso (Cuadro 24). Por otro lado, el mejor resultado se obtiene bajo el suelo arenoso cuando se usa 50 ppm de fosfato diamónico (Cuadro 23).

**Cuadro 21: Tipos de suelo en la interacción dosis 50 ppm x fosfato diamónico del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.**

SUELO	FUENTE	DOSIS	MEDIA	
Arena	FDA	50	12.44	A
FrancoA	FDA	50	9.88	B

**Cuadro 22: Tipos de suelo en la interacción dosis 50 ppm x roca fosfórica del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.**

SUELO	FUENTE	DOSIS	MEDIA	
Arena	RocaF	50	6.97	A
FrancoA	RocaF	50	5.65	B

**Cuadro 23: Tipos de suelo en la interacción dosis 100 ppm x roca fosfórica del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.**

SUELO	FUENTE	DOSIS	MEDIA	
Arena	RocaF	100	7.91	A
FrancoA	RocaF	100	5.72	B

**Cuadro 24: Tipos de suelo en la interacción dosis 200 ppm x roca fosfórica del peso seco foliar (g/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.**

SUELO	FUENTE	DOSIS	MEDIA	
Arena	RocaF	200	15.86	A
FrancoA	RocaF	200	7.5	B

Los resultados de los efectos simples de la materia seca foliar (g/pl.) de los tratamientos estudiados fueron altamente significativos en su mayoría, excepto en el efecto del tipo de

suelo usando como fuente el fosfato diamónico en una dosis de 100 ppm y 200 ppm (ver Anexo 15).

Entre los sustratos utilizados, es la arena la que presenta mayor contenido de macroporos y mínimo contenido coloidal, por lo que las aplicaciones de fertilizantes al reaccionar con el agua incrementan en la solución, es decir no hay retención o ésta es muy reducida.

Las condiciones edáficas de la arena presentan una mayor disponibilidad potencial de cambio debido a que no tienen coloides que puedan retener elemento, permitiendo una alta movilidad. La materia seca de la parte aérea como radicular no se vio afectado negativamente conforme se incrementaron los niveles de fósforo aplicado a partir de los fertilizantes fosfatados, mostrando contenidos de materia seca mayores a los tratamientos bajo el suelo franco arenoso.

#### **4.1.4 Efecto de la aplicación de fósforo y los tipos de suelo en la materia seca de las plantas de maíz**

En lo que se refiere a los efectos simples de la materia seca foliar (g/pl.) de los tratamientos aplicados, para ambos tipos de suelo, los mejores rendimientos según la fuente usada se obtienen con el uso del fosfato diamónico, siendo aún mejor cuando se usa el suelo arenoso. Este efecto se repite con la roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico, dentro de la cual el mejor resultado se obtiene en el suelo arenoso.

El tratamiento donde se aplicó fósforo en forma de fosfato diamónico fue el que presentó mayor materia seca, seguido del tratamiento donde se aplicó fósforo en forma de roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico, observando diferencias muy altamente significativas entre ellos. De la misma manera, el rendimiento de las plantas de maíz bajo arena resultó ser mejor que las plantas en suelo franco arenoso.

El fósforo mejora la fertilidad química del sustrato, mejorando la respuesta en acumulación de materia seca. Pese a la aplicación de cadmio como elemento acompañante dentro de los fertilizantes fosfatados, su baja concentración no limitó el crecimiento de las plantas de maíz. Además, la aplicación de fósforo mejoró los niveles disponibles en la solución suelo siendo así absorbido por las plantas de maíz, mejorando su desarrollo y acumulación de

materia seca. Se observa un mejor rendimiento usando el fertilizante FDA, siendo mejor en el suelo arenoso.

#### **4.1.5 Efecto de la aplicación de los diferentes niveles de fósforo y tipos de suelo en la materia seca de las plantas de maíz**

Luego de calcular los efectos simples, se puede indicar que las plantas de maíz bajo tratamientos mostraron alta asimilación en materia seca en función a la aplicación de fósforo, tanto en fuentes como en dosis, pese a la aplicación de cadmio como elemento secundario tras la aplicación de fertilizantes fosfatados.

Se analizaron los efectos simples de la materia seca foliar (g/pl.) en plantas de maíz con diferentes dosis y fuentes de fósforo y dos tipos de suelo (ver Anexo 15), donde todas las fuentes de variación fueron altamente significativas, a excepción del efecto de los tipos de suelo bajo la aplicación de fosfato diamónico en la dosis de 100 ppm y 200 ppm.

Los tratamientos que tuvieron los mejores rendimientos en materia seca foliar fue el primer tratamiento en los dos tipos de suelo. Es decir, el tratamiento que tuvo como fuente fosfato diamónico con la dosis más alta (200 ppm), pero diferenciándose en el tipo de suelo en el que fueron desarrollados.

Asimismo, la conducción del cultivo en el suelo arenoso indujo a un notorio mejor desarrollo, reflejado en la materia seca de los tratamientos bajo este tipo de suelo, a diferencia del suelo franco arenoso.

Por otro lado, los tratamientos control fueron sensibles a la no aplicación de fósforo, sin embargo no se evidenciaron síntomas de deficiencia de fósforo.

Los mejores rendimientos de la materia seca radicular también los obtuvo el primer tratamiento en los dos tipos de suelo, donde se resalta los efectos de la aplicación del FDA en sus niveles más altos para el suelo arenoso y franco arenoso, siendo estadísticamente superior el tratamiento con la mayor dosis de fosfato diamónico, resaltando de manera general los tratamientos conducidos bajo en suelo arenoso.

## **4.2 ANÁLISIS DE EXTRACCIÓN TOTAL DE CADMIO EN PLANTAS DE MAÍZ.**

A continuación se muestran los resultados del efecto observado de la aplicación de fertilizantes fosfatados con presencia de cadmio y el efecto de dos tipos de suelo sobre la extracción total de cadmio en plantas de maíz.

### **4.2.1 Efecto de los niveles de fósforo aplicado en la extracción de cadmio en plantas de maíz**

Al realizar el análisis de varianza de extracción de cadmio en la materia seca de la parte foliar (mg de Cd/planta) con diferentes dosis, fuentes de fósforo y dos tipos de suelo en la bioacumulación de cadmio en plantas de maíz, se obtuvieron diferencias muy significativas para todas las fuentes de variación tanto independientemente como en sus interacciones (ver Anexo 13), obteniendo también un coeficiente de variación aceptable (6.88%).

Considerando los efectos simples de la extracción de cadmio en la materia seca foliar (mg de Cd/planta) en plantas de maíz, los mayores niveles se obtuvieron cuando se aplicó la mayor dosis para los dos tipos de suelo y las dos fuentes (Cuadro 27, Cuadro 28). Es decir, para el suelo arenoso y franco arenoso, usando fosfato diamónico, los mayores resultados se tuvieron con la dosis de 200 ppm, seguidos de los tratamientos con 100 ppm y 50 ppm, habiendo diferencias estadísticas entre los tres niveles de partes por millón. Referente al suelo arenoso cuando se usa roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico (Cuadro 29), el mayor resultado también se obtuvo con 200 ppm, al cual le sigue el tratamiento de 100 ppm y luego 50 ppm, habiendo diferencias estadísticas entre las tres distintas dosis. El mismo caso se repite en el suelo franco arenoso usando roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico (Cuadro 30), donde la dosis de 200 ppm tuvo los más altos niveles, seguidos por las dosis de 100 ppm y 50 ppm, sin embargo entre estas dos últimas dosis no hay diferencias estadísticas.

**Cuadro 25: Dosis de fósforo en la interacción fosfato diamónico x suelo arenoso de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.**

DOSIS	FUENTE	SUELO	MEDIA	
50	FDA	Arena	0.01306	C
100	FDA	Arena	0.01593	B
200	FDA	Arena	0.02892	A

**Cuadro 26: Dosis de fósforo en la interacción fosfato diamónico x suelo franco arenoso de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.**

DOSIS	FUENTE	SUELO	MEDIA	
50	FDA	FrancoA	0.01186	B
100	FDA	FrancoA	0.01286	B
200	FDA	FrancoA	0.02119	A

**Cuadro 27: Dosis de fósforo en la interacción roca fosfórica x suelo arenoso de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

DOSIS	FUENTE	SUELO	MEDIA	
50	RocaF	Arena	0.01602	C
100	RocaF	Arena	0.01266	B
200	RocaF	Arena	0.02221	A

**Cuadro 28: Dosis de fósforo en la interacción roca fosfórica x suelo franco arenoso de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

DOSIS	FUENTE	SUELO	MEDIA	
50	RocaF	FrancoA	0.00875	B
100	RocaF	FrancoA	0.00943	B
200	RocaF	FrancoA	0.01275	A

Dentro de los efectos simples de la extracción de cadmio en la materia seca foliar (mg de Cd/planta) en plantas de maíz con diferentes dosis y fuentes de fósforo y dos tipos de suelo (ver Anexo 16), hubo muy alta significancia para las fuentes de variación que implican los niveles de fósforo aplicados y sus interacciones con los demás factores en la parte foliar.

Por otro lado, el análisis de varianza de extracción de cadmio en la materia seca de la parte radicular (mg de Cd/planta) con diferentes dosis, fuentes de fósforo y dos tipos de suelo en la bioacumulación de cadmio en plantas de maíz, también tuvo diferencias muy significativas para todas las fuentes de variación (ver Anexo 14), obteniendo también un coeficiente de variación aceptable (16.09%).

Considerando los efectos simples de la extracción de cadmio en la materia seca radicular (mg de Cd/planta) en plantas de maíz, los mayores rendimientos también se obtuvieron cuando se aplicó la mayor dosis para los dos tipos de suelo y las dos fuentes. En el suelo arenoso, usando las dos fuentes de fósforo (Cuadro 31, Cuadro 33), el mejor resultado de obtuvo usando 200 ppm, seguido por las dosis de 100 ppm y 50 ppm, sin embargo entre estas dos últimas dosis no hay diferencias estadísticas. Referente al suelo franco arenoso, los mejores resultados también se obtuvieron aplicando la mayor dosis, pero cuando se aplica fosfato diamónico, si hay diferencias estadísticas entre usar 100 ppm y 50 ppm (Cuadro 32), mientras que bajo la aplicación de roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico, los mayores niveles se consiguen con la mayor dosis (200 ppm) pero no hay diferencias entre usar 100 ppm o 50 ppm (Cuadro 34).

**Cuadro 29: Dosis de fósforo en la interacción fosfato diamónico x suelo arenoso de la absorción de cadmio radicular (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

DOSIS	FUENTE	SUELO	MEDIA	
50	FDA	Arena	0.01461	B
100	FDA	Arena	0.01518	B
200	FDA	Arena	0.02729	A

**Cuadro 30: Dosis de fósforo en la interacción fosfato diamónico x suelo franco arenoso de la absorción de cadmio radicular (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

DOSIS	FUENTE	SUELO	MEDIA	
50	FDA	FrancoA	0.01258	C
100	FDA	FrancoA	0.05013	B
200	FDA	FrancoA	0.03161	A

**Cuadro 31: Dosis de fósforo en la interacción roca fosfórica x suelo arenoso de la absorción de cadmio radicular (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

DOSIS	FUENTE	SUELO	MEDIA	
50	RocaF	Arena	0.01202	B
100	RocaF	Arena	0.01290	B
200	RocaF	Arena	0.01999	A

**Cuadro 32: Dosis de fósforo en la interacción roca fosfórica x suelo franco arenoso de la absorción de cadmio radicular (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

DOSIS	FUENTE	SUELO	MEDIA	
50	RocaF	FrancoA	0.00733	B
100	RocaF	FrancoA	0.00638	B
200	RocaF	FrancoA	0.02676	A

Dentro de los efectos simples de la extracción de cadmio en la materia seca radicular (mg de Cd/planta) en plantas de maíz con diferentes dosis y fuentes de fósforo y dos tipos de suelo (ver Anexo 17), se obtuvo una muy alta significancia para las fuentes de variación que implican los niveles de fósforo aplicados y sus interacciones con los demás factores en la parte radicular.

A medida que se incrementaron los niveles de fósforo aplicado, producto de la utilización de fuentes fosfatadas con presencia de cadmio, se observó una mayor extracción de este metal por la planta de maíz.

Se puede evidenciar que la mayor extracción de cadmio se observa en la parte radicular. La relación entre la extracción total de cadmio en la parte foliar versus la radicular muestran que en el tratamiento donde se aplicaron fertilizantes fosfatados hubo una relación baja, debido a la acumulación de cadmio en la parte radicular. Por otro lado, el testigo sin aplicación de fertilizantes fosfatados, donde la extracción de cadmio fue reducida, tuvo una relación mucho mayor.

El cadmio y otros metales pesados afectan las actividades celulares por diferentes razones, por ejemplo, la generación de reacciones oxidativas y el trastorno de reacciones enzimáticas que producen las alteraciones fisicoquímicas de los componentes macromoleculares constituyentes de las paredes celulares. Las plantas han desarrollado mecanismos para tolerar la toxicidad de estos metales pesados. Uno de los mecanismos de defensa más importantes consiste en iones metálicos inactivos en la planta, formando complejos con proteínas y fitoquelatinas (Sanità di Toppi y Gabbrielli, 1999). La fitoquelatina cisteína es un péptido rico en azufre, que se sintetiza a partir de la glutatión y quelatos de metales pesados, incluyendo cadmio, cobre y zinc (Zenk, 1996).

#### **4.2.2. Efecto de las fuentes de fósforo aplicado en la extracción de cadmio en plantas de maíz**

Se realizó el análisis de varianza de extracción de cadmio en la materia seca de la parte foliar (mg de Cd/planta) con diferentes dosis, fuentes de fósforo y dos tipos de suelo en la bioacumulación de cadmio en plantas de maíz, el cual fue expuesto anteriormente y donde se obtuvieron diferencias muy significativas para todas las fuentes de variación (ver Anexo 13).

En los efectos simples de la extracción de cadmio en la materia seca foliar (mg de Cd/planta) en plantas de maíz, los mayores niveles se obtuvieron cuando se aplicó fosfato diamónico bajo un suelo franco arenoso (Cuadro 40, Cuadro 38, Cuadro 36) para todas las dosis presentadas (200 ppm, 100 ppm y 50 ppm), respectivamente. En el suelo arenoso solo hay una excepción, que es cuando se aplica 50 ppm en la arena y mejor responde la

roca fosfórica (Cuadro 35); sin embargo, para el resto de dosis crecientes (100 ppm y 200 ppm), el fosfato diamónico es la fuente de fósforo que mayores resultados tienen en este suelo (Cuadro 37, Cuadro 39).

**Cuadro 33: Fuente en la interacción dosis 50 ppm x suelo arenoso de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

FUENTE	DOSIS	SUELO	MEDIA	
FDA	50	Arena	0.01306	B
RocaF	50	Arena	0.01602	A

**Cuadro 34: Fuente en la interacción dosis 50 ppm x suelo franco arenoso de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

FUENTE	DOSIS	SUELO	MEDIA	
FDA	50	FrancoA	0.01186	A
RocaF	50	FrancoA	0.00875	B

**Cuadro 35: Fuente en la interacción dosis 100 ppm x suelo arenoso de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

FUENTE	DOSIS	SUELO	MEDIA	
FDA	100	Arena	0.01593	A
RocaF	100	Arena	0.01266	B

**Cuadro 36: Fuente en la interacción dosis 100 ppm x suelo franco arenoso de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

FUENTE	DOSIS	SUELO	MEDIA	
FDA	100	FrancoA	0.01286	A
RocaF	100	FrancoA	0.00943	B

**Cuadro 37: Fuente en la interacción dosis 200 ppm x suelo arenoso de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

FUENTE	DOSIS	SUELO	MEDIA	
FDA	200	Arena	0.02892	A
RocaF	200	Arena	0.02221	B

**Cuadro 38: Fuente en la interacción dosis 200 ppm x suelo franco arenoso de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

FUENTE	DOSIS	SUELO	MEDIA	
FDA	200	FrancoA	0.02119	A
RocaF	200	FrancoA	0.01275	B

En referencia a los efectos simples de la extracción de cadmio en la materia seca foliar (mg de Cd/planta) en plantas de maíz con diferentes dosis y fuentes de fósforo y dos tipos de suelo (ver Anexo 16), hubo muy alta significancia para las fuentes de variación que implican las fuentes de fósforo aplicadas y sus interacciones con los demás factores en la parte foliar.

Con lo que respecta al análisis de varianza de extracción de cadmio en la materia seca de la parte radicular (mg de Cd/planta) con diferentes dosis, fuentes de fósforo y dos tipos de suelo en la bioacumulación de cadmio en plantas de maíz, se expusieron anteriormente las diferencias muy significativas para todas las fuentes de variación (ver Anexo 14).

Considerando los efectos simples de la extracción de cadmio en la materia seca radicular (mg de Cd/planta) en plantas de maíz, para el suelo franco arenoso se encontró que para sus tres dosis crecientes, la fuente fosfato diamónico fue la que obtuvo mejores resultados (Cuadro 41, Cuadro 42, Cuadro 44); mientras que bajo el suelo arenoso solo se encontraron diferencias estadísticas cuando se usó 200 ppm, y en este caso la mejor fuente también fue el fosfato diamónico (Cuadro 43).

**Cuadro 39: Fuente en la interacción dosis 50 ppm x suelo franco arenoso de la absorción de cadmio radicular (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

FUENTE	DOSIS	SUELO	MEDIA	
FDA	50	FrancoA	0.01258	A
RocaF	50	FrancoA	0.00733	B

**Cuadro 40: Fuente en la interacción dosis 100 ppm x suelo franco arenoso de la absorción de cadmio radicular (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

FUENTE	DOSIS	SUELO	MEDIA	
FDA	100	FrancoA	0.05013	A
RocaF	100	FrancoA	0.00638	B

**Cuadro 41: Fuente en la interacción dosis 200 ppm x suelo arenoso de la absorción de cadmio radicular (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

FUENTE	DOSIS	SUELO	MEDIA	
FDA	200	Arena	0.02729	A
RocaF	200	Arena	0.01999	B

**Cuadro 42: Fuente en la interacción dosis 200 ppm x suelo franco arenoso de la absorción de cadmio radicular (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

FUENTE	DOSIS	SUELO	MEDIA	
FDA	200	FrancoA	0.03161	A
RocaF	200	FrancoA	0.02676	B

Dentro de los efectos simples de la extracción de cadmio en la materia seca radicular (mg de Cd/planta) en plantas de maíz con diferentes dosis y fuentes de fósforo y dos tipos de suelo (ver Anexo 17), solo no se obtuvo significancia para los tipos de fuente bajo el suelo arenoso con una dosis de 50 ppm y también bajo el suelo arenoso con una dosis de 100 ppm.

En los tratamientos generales para la aplicación de fósforo, hubo una mayor extracción de cadmio por las plantas de maíz en la parte foliar y radicular, cuando se realizó la aplicación de fosfato diamónico, seguido del tratamiento con aplicación de roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico como fuente de fósforo.

Además, el FDA es el fertilizante con el mayor contenido de fósforo (46%  $P_2O_5$ ), el P es mucho más soluble en el suelo y su contenido de cadmio también es más soluble comparándolo con la roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico. Estas son razones por las cuales el FDA ha demostrado tener mayor extracción de cadmio para la parte foliar y radicular.

#### **4.2.3. Efecto de dos tipos de suelo en la extracción de cadmio en plantas de maíz.**

Habiendo procesado el análisis de varianza de extracción de cadmio en la materia seca de la parte foliar (mg de Cd/planta) con diferentes dosis, fuentes de fósforo y dos tipos de suelo en la bioacumulación de cadmio en plantas de maíz (ver Anexo 13) donde se obtuvieron diferencias muy significativas para todas las fuentes de variación.

Referente a los efectos simples para los distintos tratamientos derivados en absorción de cadmio foliar, cuando se aplicó 100 ppm y 200 ppm en forma de fosfato diamónico, los mayores valores se obtuvieron en el suelo arenoso (Cuadro 45, Cuadro 46). Asimismo, bajo dosis crecientes de 50 ppm, 100 ppm y 200 ppm y teniendo como fuente la roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico, los mayores niveles también se obtuvieron con el suelo arenoso (Cuadro 47, Cuadro 48, Cuadro 49).

**Cuadro 43: Tipos de suelo en la interacción dosis 100 ppm x fosfato diamónico de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

SUELO	FUENTE	DOSIS	MEDIA	
Arena	FDA	100	0.01593	A
FrancoA	FDA	100	0.01286	B

**Cuadro 44: Tipos de suelo en la interacción dosis 200 ppm x fosfato diamónico de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

SUELO	FUENTE	DOSIS	MEDIA	
Arena	FDA	200	0.02892	A
FrancoA	FDA	200	0.02119	B

**Cuadro 45: Tipos de suelo en la interacción dosis 50 ppm x roca fosfórica de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

SUELO	FUENTE	DOSIS	MEDIA	
Arena	RocaF	50	0.01602	A
FrancoA	RocaF	50	0.00875	B

**Cuadro 46: Tipos de suelo en la interacción dosis 100 ppm x roca fosfórica de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

SUELO	FUENTE	DOSIS	MEDIA	
Arena	RocaF	100	0.01266	A
FrancoA	RocaF	100	0.00943	B

**Cuadro 47: Tipos de suelo en la interacción dosis 200 ppm x roca fosfórica de la absorción de cadmio foliar (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

SUELO	FUENTE	DOSIS	MEDIA	
Arena	RocaF	200	0.02221	A
FrancoA	RocaF	200	0.01275	B

En lo que conlleva a los efectos simples de la extracción de cadmio en la materia seca foliar (mg de Cd/planta) en plantas de maíz con diferentes dosis y fuentes de fósforo y dos tipos de suelo (ver Anexo 16), únicamente no hubo significancia cuando se aplicó fosfato diamónico en una dosis de 50 ppm para el estudio del efecto de los dos tipos de suelo.

De la misma forma, luego de analizar anteriormente el análisis varianza de extracción de cadmio en la materia seca de la parte radicular (mg de Cd/planta) con diferentes dosis, fuentes de fósforo y dos tipos de suelo en la bioacumulación de cadmio en plantas de maíz (ver Anexo 14) y hallar que hay diferencias muy significativas para todas las fuentes de variación y sus interacciones, se procedió a analizar los efectos simples en la parte radicular.

Sobre los efectos simples para los distintos tratamientos derivados en absorción de cadmio radicular, el suelo arenoso solo resulta tener mayor absorción de cadmio cuando se aplica roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico en la dosis de 100 ppm (Cuadro 51). En este caso hay un contraste, ya que el suelo franco arenoso tiene los mejores resultados cuando se aplica en forma de fosfato diamónico en la dosis de 100 ppm (Cuadro 50) y roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico en la dosis de 200 ppm (Cuadro 52).

**Cuadro 48: Tipos de suelo en la interacción dosis 100 ppm x fosfato diamónico de la absorción de cadmio radicular (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

SUELO	FUENTE	DOSIS	MEDIA	
Arena	FDA	100	0.01518	B
FrancoA	FDA	100	0.05013	A

**Cuadro 49: Tipos de suelo en la interacción dosis 100 ppm x roca fosfórica de la absorción de cadmio radicular (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

SUELO	FUENTE	DOSIS	MEDIA	
Arena	RocaF	100	0.01290	A
FrancoA	RocaF	100	0.00638	B

**Cuadro 50: Tipos de suelo en la interacción dosis 200 ppm x roca fosfórica de la absorción de cadmio radicular (mg Cd/pl) en plantas de maíz y prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad**

SUELO	FUENTE	DOSIS	MEDIA	
Arena	RocaF	200	0.01999	B
FrancoA	RocaF	200	0.02676	A

En los efectos simples de la extracción de cadmio en la materia seca radicular (mg de Cd/planta) en plantas de maíz con diferentes dosis y fuentes de fósforo y dos tipos de suelo (ver Anexo 17) no se encontraron significancias para los tipos de suelo aplicando fosfato diamónico en 50 ppm, tipos de suelo aplicando fosfato diamónico en 200 ppm y tipos de suelo aplicando roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico en 50 ppm.

La arena tiene mayor cantidad de macroporos y mínimo contenido coloidal, por lo que cuando se aplicó el fertilizante fosfatado y este reaccionó con el agua, este aumentó en la solución, incrementándose así la presencia directa y movilización del cadmio a las partes aéreas de la planta. Por otro lado, los cultivos en suelos arenosos y con poca materia orgánica tienden a absorber la mayor cantidad de un metal pesado que particularmente son el cadmio y el zinc (Rattan et al., 2005).

Las diferencias encontradas en la absorción de Cd según los tipos de suelo, pueden explicarse por las diferencias físico-químicas que caracterizan a estos dos tipos de suelo. Para ser más específicos, el suelo franco arenoso tuvo un porcentaje considerable de arcilla (18%), mientras que el suelo arenoso no tuvo (0%). Por lo tanto, el suelo franco arenoso va a presentar mayor retención de este metal en el suelo, y el transporte de este elemento hacia los tallos y hojas será mucho menor.

Otras diferencias encontradas entre estos tipos de suelo son los carbonatos. En el suelo franco arenoso el porcentaje de carbonatos fue 3.3%, mientras que en el suelo arenoso solo se tuvo 0.3%. Por lo tanto, es de gran interés seguir realizando trabajos de investigación, y se recomienda determinar el efecto de los carbonatos en distintos tipos de suelos.

En algunos estudios de maíz (con cultivos hidropónicos) se ha encontrado mayor concentración de cadmio en las raíces del cultivo respecto de sus brotes (WHO, 1992). Esto explica también por qué el contenido de cadmio es mucho mayor en las raíces que en la parte foliar.

Del mismo modo, en el caso del maíz las menores concentraciones de cadmio están en los granos, consumidos por el ser humano y los animales. Sin embargo, otras partes de la planta son dadas como alimento a animales o se incorporan al suelo llegando así por otras vías al ser humano.

#### **4.2.4 Efecto de la aplicación de fósforo y tipos de suelo en la extracción de cadmio en plantas de maíz.**

En lo que se refiere a los efectos simples para los distintos tratamientos derivados en absorción de cadmio foliar, para ambos tipos de suelo la mayor extracción de cadmio se obtiene con el uso del fosfato diamónico, siendo aún mejor bajo el suelo arenoso. Este efecto se repite con la roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico, dentro de la cual la mayor extracción de cadmio foliar se obtiene en el suelo arenoso.

Se puede señalar que los tratamientos con la aplicación de fósforo a partir de fertilizantes fosfatados, la extracción de cadmio fue significativamente mayor por su contenido en el fertilizante. Asimismo, cuando se usó el suelo arenoso, la extracción total de cadmio presentó un mayor valor.

Se apreció también que hay una relación directa entre la aplicación de una fuente fosfatada y la absorción de cadmio, ya sea radicular o foliar.

Para este estudio, el fertilizante fosfato diamónico fue el que obtuvo mayor absorción, reforzándose este resultando cuando el tratamiento se conduce en suelo arenoso.

Se puede observar también que los tratamientos con la aplicación de fósforo a partir de fertilizantes fosfatados mostraron una extracción de cadmio significativamente mayor por su contenido en el fertilizante.

A manera experimental, se midieron las concentraciones de Cd (ppm) en los dos fertilizantes usados, y los niveles más altos lo obtuvo el fosfato diamónico, tanto para Cd en el fertilizante (10.6 ppm) como para Cd diluido (1.53 ppm). Caso contrario, para la roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico, se obtuvieron resultados mucho más bajos, tanto para Cd en el fertilizante (5.83 ppm) como para Cd diluido (0.43 ppm). De esta manera, reforzamos los resultados obtenidos, en los cuales el fosfato diamónico mostró mayor presencia y solubilidad de Cd.

#### **4.2.5. Efecto de la aplicación de los diferentes niveles de fósforo y tipos de suelo en la extracción total de cadmio en plantas de maíz**

Se analizaron los efectos simples de la extracción de cadmio en la materia seca foliar y radicular (mg de Cd/planta) en plantas de maíz con diferentes dosis y fuentes de fósforo y dos tipos de suelo (ver Anexo 16, Anexo 17), y se calcularon los efectos simples para los distintos tratamientos derivados en materia seca foliar y radicular, de los cuales se puede evidenciar que el mejor tratamiento fue el “tratamiento 1” bajo en suelo arenoso, el cual tuvo la dosis más alta (200 ppm) del fertilizante fosfato diamónico. Este “tratamiento 1” bajo el suelo franco arenoso y el “tratamiento cuatro” bajo el suelo arenoso también mostraron cantidades altas de absorción, ya que recibieron las dosis más altas pero con fosfato diamónico y roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico, respectivamente.

Las plantas que fueron conducidas en suelo arenoso tuvieron mayor absorción de cadmio foliar (mg Cd/planta).

El cadmio, una vez aportado por la vía de la fertilización fosfatada, puede ser absorbido por los cultivos y llegar hasta quienes se alimentan de ellos. En la parte foliar se observa que la mayor absorción de cadmio se tuvo en los tratamientos que recibieron las mayores dosis (200 ppm), observándose la tendencia de que a mayor dosis, la extracción aumenta. El suelo arenoso tuvo los resultados más altos de absorción, probablemente debido a sus propiedades no retentivas, por lo que el cadmio puede movilizarse y ser asimilado por el cultivo.

En la parte radicular, se puede señalar también que el mejor tratamiento fue el “tratamiento uno” en un suelo arenoso (200 ppm de fosfato diamónico), seguido cuando se aplicó el mismo tratamiento en un suelo franco arenoso y el “tratamiento cuatro” (200 ppm de roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico) en un suelo arenoso.

Se observó también que la extracción de cadmio fue mayor en la parte radicular. Secara et al. (2004) realizó un estudio sobre la acumulación y distribución del cadmio y plomo en nueve órganos de cultivos, y obtuvo resultados similares a los de esta investigación. Además, se comprueba lo propuesto por Chan y Hale (2004), quienes afirman que en la planta, el cadmio se acumula preferentemente en la raíz, secuestrado en la vacuola de las células, y solo una pequeña parte es transportada a la parte aérea de la planta concentrándose en orden decreciente en tallos, hojas, frutos y semillas.

Del mismo modo, la concentración de cadmio en los cultivos depende de la especie, entre gramíneas y leguminosas la extracción es ampliamente diferente (Rattan et al. 2005). Por lo tanto, la extracción de cadmio va a variar mucho, porque esta va a depender de factores como por ejemplo de la rizósfera. Dependiendo de las fuentes de fosforo y de la aplicación de la materia orgánica la planta va a tener exudados diferentes, y esto puede ser ventajoso o desventajoso para la absorción de cadmio.

La regulación de la conducta de los metales en suelos viene por el hecho que a mayor afinidad, mayor inmovilización de los metales y, en consecuencia, menor movilidad y disponibilidad para las plantas (González, 1993). Schutzenhubel et al. (2001) demuestran que el cadmio puede causar graves daños a las puntas de las raíces, por lo que se aturde la absorción de nutrientes causando deficiencia de ellos en altas concentraciones, lo que no se observó en el presente experimento.

En el caso del maíz, las menores concentraciones de cadmio están en los granos, consumidos por el ser humanos y los animales; sin embargo, otras partes de la planta son dadas como alimento a animales o se incorporan al suelo, llegando así por otras vías al ser humano.

Investigaciones recientes señalan que la exposición a reducidas concentraciones de cadmio produce alteraciones a los huesos con consecuentes riesgos de fracturas. Esto debido a que el cadmio puede interferir con el metabolismo del calcio, la vitamina D y el colágeno (Stassen, 1999).

## V. CONCLUSIONES

Bajo las condiciones en las cuales se efectuó el trabajo, concluimos:

- 1) La materia seca estuvo influenciado por los factores dosis, fuente y suelo. La mayor materia seca foliar se obtuvo con la dosis de 200 ppm de fosfato diamónico en suelo arenoso (23.13 g/pl), seguido por la dosis de 200 ppm de fosfato diamónico en suelo franco arenoso (22.31 g/pl). Por lo tanto, no hubo aparentes efectos negativos en la producción de materia seca a pesar del nivel de cadmio aplicado, debido a su baja concentración en el fertilizante fosfatado.
- 2) El fosfato diamónico fue el fertilizante que mejor respondió estadísticamente a la producción de materia seca, frente a la roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico, sobre todo cuando se aplicó con la mayor dosis en el suelo arenoso, seguido por el mismo tratamiento en suelo franco arenoso.
- 3) Los mejores resultados en rendimiento de materia seca se tuvieron en el suelo arenoso, para las dosis de 200 ppm usando a la roca fosfórica como fuente, pero también cuando se usó fosfato diamónico con la dosis 50 ppm.
- 4) Referente a la absorción de cadmio por la planta en la parte foliar, los mayores niveles se obtuvieron con las mayores dosis, caso particular cuando se usó 200 ppm de fosfato diamónico en suelo arenoso, seguido por la aplicación de 200 ppm de roca fosfórico en suelo franco arenoso.
- 5) Sobre la absorción de cadmio por la planta en la parte radicular, el mayor resultado se obtuvo también con la mayor dosis, y teniendo como fuente el fosfato diamónico. En otras palabras, cuando se aplicó 200 ppm de fosfato diamónico en el suelo franco arenoso, seguido por el tratamiento de 200 ppm de fosfato diamónico en el suelo arenoso.

- 6) La fuente fosfato diamónico presentó la mayor absorción de cadmio por las plantas de maíz en la parte foliar y radicular. En la parte foliar, los mejores niveles se obtuvieron cuando se aplicó fosfato diamónico con una dosis de 200 ppm en suelo arenoso, seguido por la aplicación de 200 ppm de fosfato diamónico pero en suelo franco arenoso. Por otro lado, en la parte radicular se halló que cuando se usó fosfato diamónico con la dosis de 100 ppm en suelo franco arenoso se tienen mayores niveles que usando 200 ppm con la misma fuente en el mismo tipo de suelo.
  
- 7) Las plantas de maíz tuvieron los más altos valores para la extracción de cadmio en la parte foliar bajo el suelo arenoso, sobre todo cuando se usó 200 ppm de fosfato diamónico seguido por el tratamiento de 200 ppm de roca fosfórica. En la parte radicular este resultado no fue similar, ya que los mayores valores de extracción se obtuvieron en el suelo franco arenoso, y en esta textura se halló que se obtuvieron mayores niveles cuando se aplicó fosfato diamónico con la dosis de 100 ppm, seguido por el tratamiento de 200 ppm bajo la fuente de roca fosfórica.

## **VI. RECOMENDACIONES**

En base a los resultados hacemos las siguientes recomendaciones:

- 1) Efectuar relaciones entre el contenido de fósforo del suelo y la concentración de Cadmio, para disminuir su acumulación en el suelo y su concentración en las cosechas.
- 2) Relacionar el tipo de suelo con la concentración de fósforo y su efecto en la concentración de cadmio en el suelo.
- 3) Evaluar la acumulación de cadmio en seres vivos y de los cultivos producidos con altas concentraciones de cadmio.
- 4) Realizar trabajos de investigación sobre el uso elementos que puedan neutralizar la movilidad del cadmio.
- 5) Identificar valores críticos de cadmio que deben presentar los fertilizantes fosfatados para su uso en campos de cultivo.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acosta, I; Moctezuma-Zárate, M; Cárdenas, J; Gutiérrez, C. (2007). Bioadsorción de cadmio en solución acuosa por biomasa fúngicas. *Rev. Información Tecnológica*. 18: 9-14.
2. Adriano, D. 2001. Trace elements in terrestrial environments. Biogeochemistry, bioavailability and risks of metals. Springer-Verlang, New York.
3. Aguilar, J; Dorronsoro, C; Bellver, R; Fernández, E; Fernández, J; García, I; Iriarte, A; Martín, F; Ortiz, I; Simón, M. 2003. Contaminación de suelos tras el vertido tóxico de Aznalcóllar. Universidad de Granada-Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. España.
4. Ahumada, I; Schalscha, E. 1995. Efecto de la sorción de cadmio y cobre en suelos. *Agroquímica*, Santiago, Chile, v. 39, p 101-110.
5. Andrade, F.H.; A.G. CIRILO; S.A. UHART; M.E. OTEGUI. (1996). *Ecofisiología del cultivo del maíz*. Dekalb. Press. Buenos Aires, Argentina.
6. Aldrich, S.R. (1974). *Producción moderna del maíz*. Editorial Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina. 308 p.
7. Alloway, BJ. 1995. Chapter 2: Soil process and the behavior of heavy metals. In: Alloway BJ. (ed). *Heavy metals in soils*. Blackie Academic and Professional, London, Second Edition, pp11-37.
8. Alloway, BJ; Jackson, A. 1991. The behavior of heavy metals in sewage sludge-amanded soils. *The Science of the Total Environment*. 100: 151-176.

9. Alloway; BJ; Steinnes, E. 1999. Anthropogenic additions of cadmium to soils. En Cadmium in Soils and Plants (eds. McLaughlin, M.J. y Singh, B.R.), pp 97-123.
10. Astolfi, S; Zuchi, S; Passera, C. 2005. Effect of cadmium on H(+)ATPase activity of plasma membrane vesicles isolated from roots of different S-supplied maize (*Zea mays* L.) plants. Plant Science. 169: 361-368.
11. Azcon-Bieto, J. y Talón, M. (2000). Fundamentos de la Fisiología Vegetal. Ediciones Universidad de Barcelona. Barcelona, España.
12. Bak, J; Jensen, J; Larsen, M; Pritzl, G; Scott-Fordsmand, J. 1997. A heavy metal monitoring-programme in Denmark. The Science of the Total Environment. 207: 179-186.
13. Basta, N; Pantone, D.J; Tabatabai, M.A. 1993. Path analysis of heavy metal adsorption by soil. Agronomy Journal. 85: 1054-1057.
14. Basta, N; Tabatabai, M.A. 1992. Effect of cropping systems on adsorption of metals by soils. II. Effect of pH. Soil Science. 153: 195-204.
15. Bear, F.E. (ed.). 1964. Chemistry of the soil. 2nd ed. Reinhold, New York.
16. Benavides, M; Gallego, S; Tomaro, M. 2005. Cadmium toxicity in plants. Brazilian Journal of Plant Physiology. 17: 21-34.
17. Bennet, O.L; R.C., Longnecker and G. Gray. 1954. A comparison of the efficiency of 18 sources of phosphate fertilizers on Houston black clay. SoilSci. Soc. Am. Proc. 18: 408-412.
18. Blazka, M; Shaik, Z. 1991. Differences in cadmium and mercury uptakes by hepatocytes: role of calcium channels. Toxicol Appl Pharmacol. 110: 355-361.
19. Berger, J (1967). El maíz, su producción y abonamiento. Agricultura de las Américas, 208 p. EEUU.

20. Black, A.L. 1968. Nitrogen and phosphorous fertilization for production of crested wheat grass and native grass in northeastern Montana. *Agron. J.* 60:213-21.
21. Black C. A., Legg. J. O., Goring, C. A. I. and Mehta, N. C .1954. Determination of organic phosphorus in soils. I. Extraction method. *SoilSci. Soc. Amer. Proc.* L&E 443-449.
22. Bodilla, F. 1989. *Toxicología ambiental*. Ediciones Panamericana, Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. 456 p.
23. Boekhold, AE; Temminghoff, EJM; Van Der Zee, Seatm. 1993. Influence of electrolyte composition and pH on cadmium sorption by an acid sandy soil. *Journal of Soil Science.* 44: 85-96.
24. Bohn, H; McNeal, B; O'Connor, G. 1979. *Soil Chemistry*. New York. 329 pp.
25. Bolaños, S. 1998. Evaluación de la eficiencia de los fertilizantes simples y compuestos en el cultivo de maíz (*Zea mays*) bajo condiciones de invernadero. Tesis para optar el título de Ing. Agrónomo. UNALM. Lima- Perú.
26. Brown, S; Chaney, R; Angle, J; Baker, A. 1994. Phytoremediation potential of *Thiaspia caerulescens* and bladder campion for zinc and cadmium contaminated soil. *J. Environ. Qual.* 23: 1151-1157.
27. Cabello, R. 1979. Determinación del Coeficiente Aparente de Uso de Fósforo de diferentes fuentes, bajo condiciones de invernadero en Dos cultivos consecutivos Papa- Maíz en suelo ácido de Villa Rica. Tesis para optar el título de Ing. Agrónomo. UNALM. Lima- Perú.
28. Carbonell, A.A., Porthouse, J.D., Mulbah, C.K., DeLaune, R.D., Patrick Jr., W.H., 1999. Metal solubility in phosphogypsum-amended sediment under controlled pH and redox conditions. *J. Environ. Qual.* 28, 232–242.

29. Carmelino, S. 2001. Evaluación de Fertilizantes Compuestos Minerales y Orgánico-Minerales en Dos suelos de irrigación usando maíz como indicador bajo invernadero. Tesis para optar el título de Ing. Agrónomo. UNALM. Lima- Perú.
30. Chan, D; Hale, B. 2004. Differential accumulation of Cd in durum wheat cultivars: uptake and retranslocation as sources of variation. *Journal of Experimental Botany*. 55: 2571-2579.
31. Christensen, TH; Haung, PM. 1999. Solid phase cadmium and the reactions of aqueous cadmium with soil surfaces. En: *Cadmium in Soils and Plants* (eds. McLaughlin, M.J. y Singh, B.R.), 65-96 p.
32. Clemens, S. 2006. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochemie*. 88: 1707-1719.
33. Clemens, S; Palmgreen, M; Krämer,U. 2002. A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends in Plant Science*. 7: 309-315.
34. Contreras, F., Herrera, T. e Izquierdo, A. 2005. Efecto de dos fuentes de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) sobre la disponibilidad de cadmio para plantas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en suelos de Barlovento, estado Miranda. *Venesuelos*. 13: 52 - 63.
35. Cooke, G. 1987. Fertilización para rendimientos máximos. Compañía Editorial Continental A.S. México.
36. Cooke, G. 1965. Fertilizantes y sus usos. Compañía Editorial Continental A.S. México.
37. Das, P; Samantaray, S; Rout, GR. 1998. Studies on cadmium toxicity in plants: a review. *Environ Pollution*. 98: 29-36.
38. Davelouis, J. 1991. Fertilidad del suelo. Lima, Perú.

39. De Meeûs., Eduljee G.H., Hutton M. (2002). Assessment and management of risks arising from exposure to cadmium in fertilizers. I. Science of the Total Environment. 291 (1-3): 167-187.
40. Del Río, L. A., Corpas, F. J., Sandalio, L. M., Palma, J. M., Gómez, M. and Barroso, J. B. 2002. Reactive oxygen species, antioxidant systems and nitric oxide in peroxisomes. Journal of Experimental Botany. 53: 1255-1272.
41. Doménech X. 1997. Química del suelo. El impacto de los contaminantes. Ed. Miraguano, pp 11-18, 29-52, 119-122.
42. Dominguez, R. C., F. Peña y Delgado, A. 2001. Effect of soil properties and reclamation practices on phosphorus dynamics in reclaimed calcareous marsh soils from the Guadalquivir Valley, SW Spain. Arid Land Research and Management 15: 000-000.
43. Dominguez, V.A (1984). Tratado de fertilización. Primera Edición. Mundi- Prensa. España 585 pp.
44. Evans, LJ. 1989. Chemistry of metal retention by soils. Environmental Science and Technology. 23: 1046-1056.
45. Fassbender, A. W. 1975. Química de Suelos. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. 39 pp: 115-126. Turrialba, Costa Rica.
46. Facchinelli, A., Sacchi, E., Mallen, L., 2001. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils. Environmental Pollution 114, 313–324.
47. Gallego, S. M., Tomaru, M. L. 1996. Effect of heavy metal ion excess on sunflower leaves: evidence for involvement of oxidative stress. Plant Science 121, 151-159.

48. García, I; Dorronsoro, C. 2011. Contaminación de los suelos. Tema 15: Contaminación por metales pesados. Disponible en <http://edafología.urg.es/conta/tema15/introd.htm>
49. García-Gomez, A., Bernal, M. P., Roig, A. 2005. Organic matter fractions involved in degradation and humification processes during composting. *Compost Science Util.* 13(2), 127-135.
50. Garnier, L; Simon-Plas, F; Thuleau, P; Agnel, J; Blein, J; Ranjeva, R; Montillet, J. 2006. Cadmium affects tobacco cells by a series of three waves of reactive oxygen species that contribute to cytotoxicity. *Plant Cell and Environment.* 29: 1956-1969.
51. Gouia, H; Ghorbal, MH; Meyer, C. 2000. Effects of cadmium on activity of nitrate reductase and on other enzymes of nitrate assimilation pathway in bean. *Plant Physiology and Biochemistry.* 38: 629-638.
52. Gratão, P. L., Prasad, M. N. V., Cardoso, P. F., Lea, P. J., Azevedo, R. A. 2005. Phytoremediation: green technology for the clean up of toxic metals in the environment. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 17: 53-64.
53. Hamer D. H., 1986. Metallothionein, *Annual Review of Biochemistry.* 55, 913–951.
54. Hedin, R. S. and G. R. Watzlaf. 1994. The Effects of Anoxic Limestone Drains on Mine Water Chemistry. In *Proceedings of the International Land Reclamation and Mine Drainage Conference*, Pittsburgh, PA. p. 185-194.
55. Hepp, N., Mindak, H., Gasper, J., Thompson, C. and Barrows, J. 2008.
56. Holmgren, G. G., Meyer, M. V., Chaney, R. L. and Daniels, R. B. 1993. Cadmium, lead, zinc, copper and nickel in agricultural soils of the United States of America. *Journal of Environmental Quality.* 22, 335-348.

57. International Plant Nutrition Institute (IPNI). 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: Reconciling changing concepts of soil phosphorus behavior with agronomic information. *FAO Fertilizer And Plant Nutrition Bulletin*. 18.
58. Iretskaya, S.N. and Chien S.H. 1999. Comparison of cadmium uptake by five different food grain crops grown on three soils of varying pH. *Community of Soil Science and Plant Analysis*. 30:441-448.
59. Iwegbue, C., Isirimah, N., Igwe, C. and Williams, E. 2006. Characteristic level of heavy metals in soil profiles of automobile mechanic waste dumps in Nigeria. *Environmentalist*, 26: 131-137.
60. Iwegbue, C. 2007. Distribution of heavy metals in sediments and surface water of crude oil impacted area in the Niger Delta, Nigeria. *Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research*, 50(3): 178-183.
61. Kabata-Pendias, A. 1995. Agricultural problems related to excessive trace metal contents of soils. En: *Heavy metals problems and solutions* (eds. W. Salomons et al.), pp 3-18.
62. Kabata-Pendias, A. 2000. *Trace elements in soils and plants*. Third Edition. CRC Press. Boca Raton, USA. 413 p.
63. Kabata-Pendias, A. 2004. Soil-Plant transfer of trace elements- an environmental issue. *Geoderma*. 122: 143-149.
64. Larsen, S. 1957. Soilphos phorus. *Adv. On Agronomy*. 19: 151-206.
65. Lucho-Contantino, C. A, Alvarez-Suarez, M., Beltran-Hernandez, R. I., Prieto-Gercia, F y Poggi-Varaldo, H. M. 2005. Análisis multivariado de la acumulación y fraccionamiento de los principales elementos traza en suelos para agricultura en el Estado de Hidalgo, México, irrigados con agua de desechos. *Environmental International* 31: 313-323.

66. Maksymiec W., Malgorzata W., Krupa Z. 2007. Variation in oxidative stress and photochemical activity in *Arabidopsis thaliana* leaves subjected to cadmium and excess copper in the presence or absence of jasmonate and ascorbate. *Chemosphere*. 66:421–427.
67. Manrique CH., A. (1997). El maíz en el Perú. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. CONCYTEC Lima- Perú.
68. Marschner. H. 1995. Mineral nutrition of high plant. Academic Press, pp: 330-355.
69. Marschner, H., Cakmak, J. 1989. High light intensity enhances chlorosis and necrosis in leaves of zinc, potassium, and magnesium deficient bean (*Phaseolus vulgaris*) plants. *Journal of Plant Physiology*, 134: 924-934.
70. McLaughlin MJ; Singh, BR. 1999. Cadmium in soils and plants: a global perspective. In: McLaughlin, M.J.; Singh, B.R. (Ed.). *Cadmium in soils and plants*. Dordrecht: Kluwer Academic, p. 1-19.
71. McLaughlin, M.J., TILLER, K.G., NAIDU, R. AND STEVENS, D.P. 1996. Review: The behavior and environmental impact of contaminants in fertilizers. *Australian Journal of Soil Research* 34, 1-54.
72. McLaughlin, M.J. 2001. Australia's National Cadmium Minimisation Strategy. In *Fertilizers in Focus*. FIFA Conference, 28-29 May 2001. Fertilizer Industry Federation of Australia, Inc., Canberra, Australia.
73. McLean, J; Bledsoe, B. 1992. Behavior of metals in soils. Environmental Protection Agency. 18: 1-25.
74. Mengel K. and A. KIRKBY (1987). Principles of plant nutrition. Ed. International Potash Institute. Berna- Suiza. 4° edition. P. 419-420.

75. Monteiro, A; Pereyra, G; Araujo, C. 2006. Biodisponibilidad de cadmio y plomo en un suelo aplicado con fertilizantes fosforados. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, Recife, Brasil. V.63, n.4, p.328-332.
76. Moya, A. 2009. Evaluación Agronómica de la acción solubilizante de residuos hidrolizados en fuentes fosfatadas naturales en el cultivo del maíz en condiciones de invernadero. Tesis para optar el título de Ing. Agrónomo. UNALM. Lima- Perú. 61p.
77. Msaky, J.J.. Calvet, R. 1990. Adsorption behavior of copper and zinc in soils: influence of pH on adsorption characteristics. *Soil Science* 150: 513-521.
78. Nebel, B.J. y Wright, R.T. 1999. *Environmental Science: The Way the World Works*. New Jersey. Published by Prentice-Hall College Div.
79. Nicholson, F.A.; Smith, S.R.; Alloway, B.J.; Carltonsmith, C.; Chambers, B.J. 2003. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. *The Science of the Total Environment*, v.311, p.205-219.
80. Noel G., Nelson. 1976. Evaluación de fosfatos naturales a diferentes niveles de  $P_2O_5$  y tamaño de partículas con cultivo de sorgo (*Sorghum vulgare* L.) bajo condiciones de invernadero. Tesis para Ing. Agrónomo. UNA. La Molina, Lima, Perú.
81. Norvell, WA; WU, J; Hopkins, DG; Welch, R. 2000. Association of cadmium in durum wheat grain with soil chlorine and chelate-extractable soil cadmium. *Soil Science Society of America Journal*. 64: 2162-2168.
82. Nriagu, J. O. 1988. Review: Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature*. 333(6169):134-9.
83. Oliver, M. 1997. Soil and human health: a review. *European Journal of Soil Science*. 48: 573-392.

84. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2007. Utilización de las rocas para una agricultura sostenible. Roma. 73pp.
85. Österas A. H. and Greger, M. 2006. Interactions between calcium and copper or cadmium in Norway spruce. *Biology Plantarum*. 50:647-652.
86. Perfus-Barbeoch, L; Leonhardt, N; Vavasseur, A; Forestier, C. 2002. Heavy metal toxicity: cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status. *Plant Journal*. 32: 539-548.
87. Pernia, B; De Sousa, A; Reyes, R; Castrillo, M. 2008. Biomarcadores de contaminación por cadmio en las plantas. Caracas, Venezuela. *Asociación Interciencia*. 33: 112-119.
88. Pinto, E., Sigaud-Kutner, S., Leitao, M.A., Okamoto, O.K., Morse, D. and Colepicolo, P. 2003. Heavy metal-induced oxidative stress in algae. *Journal of Phycology*. 39, 1008–1018.
89. Pomponi, M., Censi, V., Di Girolamo, V. et al. 2006. Overexpression of *Arabidopsis* phytochelatin synthase in tobacco plants enhances Cd<sup>+2</sup> stop tolerance and accumulation but not translocation to the shoot. *Planta*. 223: 180-190.
90. Prince, W; Kumar, S; Doberschutz, K; Subburam; V. 2002. Cadmium toxicity in mulberry plants with special reference to the nutritional quality of leaves. *Journal of Plant Nutrition*. 25: 689-700.
91. Rattan, R. K., Datta, S. P., Chonkar, P. K., Suribabu, K. and Singh, A. K. 2005. Long term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal contents in soil, crops and ground water. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 109, 310–322.
92. Rieuwerts et al., Rieuwerts, I., Thornton, M., Farago, M., Ashmore, M. 1998. Factors influencing metal bioavailability in soils: preliminary investigations for the

- development of a critical loads approach for metals. *Chemical Speciat. Bioavail.* 10 (2), pp. 61-75.
93. Roberts, T. 1996. Cadmium and phosphate – issues and options. Symposium of new developments in fertilizer manufacture. Canada. 39: 123-136.
94. Rodríguez, H. and R. Fraga. 1999. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnol. Adv.* 17:319-339.
95. Rodríguez, J; Valdez, R; Lara, J; Rodríguez, H; Vásquez, R; Magallanes; R; García, J. 2006. Soil nitrogen fertilization effects on phytoextraction of Cd and Pb by tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). *Bioremediation Journal.* 10: 105-114.
96. Rodríguez-Serrano, M; Romero-Puertas, M; Zabalza, A; Corpas, F; Gómez, M; del Río, L; Sandalio, L. 2006. Cadmium effect on the oxidative metabolism of pea roots. Imaging of ROS and NO production in vivo. *Plant Cell and Environment.* 29: 1532-1544.
97. Romero-Puertas, M. C., Palma, J. M., Gómez, M., Del Río, L. A. and Sandalio, L. M. 2002. Cadmium causes the oxidative modification of proteins in pea plants, in: *Plant, Cell and Environment.* Vol. 25, pp 677-686.
98. Ross, S. 1994a. Sources and forms of potentially toxic metals in soil-plant systems. En: *Toxic metals in soil-plants systems* (ed. S. M. Ross), pp 3-25.
99. Ross, S. 1994b. Retention, transformation and mobility of toxic metals in soils. En: *Toxic metals in soil-plants systems* (ed. S. M. Ross), pp 63-152.
100. Salt, D; Prince, R; Pickering, I; Raskin, I. 1995. Mechanism of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard. *Plant Physiology.* 109: 1427-1433.
101. Salt, D; Wagner, G. 1993. Cadmium transport across tonoplast of vesicles from oat roots. Evidence for a Cd<sup>2+</sup>/H<sup>+</sup> antiport activity. *Journal of Biological Chemistry.* 268: 12297-12302.

102. Sánchez-Monedero, M. A., Mondini, C., Nobili, M., Leita, L. and Roig, A. 2004. Land application of biosolids. Soil response to different stabilization degree of the treated organic matter. *Waste Management* 24(4), 325-332.
103. Sanitá di Toppi, L; Gabbrielli, R. 1999. Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany*. 41: 105-130.
104. Sánchez G., Goodman J. J. and Stuber W. 2002. Isozymatic diversity of the races of maize of the Americas. *Maydica* 45: 185-203.
105. Sandalio, L.M., Dalurzo, H.C., Gomes, M., Romero-Puertas, M. and del Rio, L.A. 2001. Cadmium- induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants. *J. Exp. Bot.*, 52, 2115-2126.
106. Schutzendubel, A., Schwanz, P., Teichmann, T., Gross, K., Langenfeld - Heyser, R., Godbold, D., Polle, A. 2001. Cadmium- induced changes in antioxidative systems, hydrogen peroxide content and differentiation in Scots pine roots. *Plant Physiology*. 127: 887-898.
107. Secara, A., Poniedzialek, M., Ciura, J., Jedrzczyk, E. 2004. Cadmium and lead accumulation and distribution in the organs of nine crops: implications for phytoremediation. *Polish Journal of Environmental Studies*. 14: 509-516.
108. Shah, K., Nongkynrih, J. M. 2007. Metal hyperaccumulator and bioremediation. *Biologia Plantarum*. 51:618-634.
109. Silva Rossi, M. 2004. Evaluación de la estabilidad estructural en superficie, a través de las propiedades hidráulicas. En: *Metodologías físicas para la investigación del suelo- Penetrometría e Infiltración*. Editorial de la Universidad de la Plata. Pp: 121-130.
110. Silveira MLA, Alleon LRF; Guilherme LRG. 2003. Biosolids and heavy metals in soils. *Scientia Agricola*. 60: 793-806.

111. Singh, P; Tewari, R. 2003. Cadmium toxicity induced changes in plant water relations and oxidative metabolism of *Brassica juncea* L. plants. *Journal of Environmental Biology*. 24: 107-112.
112. Smolders, E. 2001. Cadmium uptake by plants. Laboratory of soil fertility and soil biology. The Catholic University of Leuven. Belgium, pp 177-183.
113. Sposito, G. 1989. The chemistry of soils. New York: Oxford University. 277 pp.
114. Stassen, J; Roells, H; Emelianov, D and Kuznetsova T. 1999. Environmental Exposure to cadmium, forearm bone density, and risk of fractures: Prospective population study. United Kingdom, *The Lancet*, 353 (9159): 1140-1144.
115. Stigliani, W. M., Forsell, O. 1994. Costs and benefits of removing cadmium from phosphate fertilizer. IIASA, Laxenburg, Austria.
116. Stigliani, W. M., Hesterberg, D and Imeson, A. C. 1992. Chemical time bombs: linkages to scenarios of socioeconomic development. IIASA, Laxenburg, Austria.
117. Stohs S. J., Bagchi, D. 1995. Oxidative mechanisms in the toxicity of metal ions. *Free Radical Biology and Medicine*. 18: 321-336.
118. Stoepler M. 1991. Cadmium. In: Merian E. (ed). *Metals and their compounds in the environment*. VCH, New York, pp 803-851.
119. Tang, W. 2000. Mechanisms of cadmium nephrotoxicity. Summary, Doctoral Thesis. University of Rhode Island.
120. Tapia, R. 1994. Toxicidad de metales pesados en seres humanos. Seminario impacto ambiental de metales pesados en Chile, Santiago, Chile, 251 p.
121. Teusher, H y Adler, R. 1965. El suelo y su fertilidad. Tercera Edición. Ed. Reverté. Zaragoza, España.

122. Thomine, S., Wang, R., Ward, J. M., Carwford, N. M. and Schroeder, J. I. 2000. Cadmium and iron transport by members of a plant metal transporter family in *Arabidopsis* with homology to Nramp genes. Proceedings of the National Academy of Sciences. USA. 97: 4991-4996.
123. Tiller, K. 1989. Heavy metals in soils and their environmental significance. Advances in soil science. 9: 113-142.
124. Tisdale, S. L. y W.L. NELSON. 1970. Fertilidad de los suelos y fertilizantes. Cuarta Edición. Ed. Montaner y Simon S.A. Barcelona. 760 p.
125. Tisdale, S.L. y S.L. RUCKER. 1964. Crops response to various phosphates. The Sulphur Institute. Tech. Bull. 9: 3-17.
126. Tito, D. 2003. Estudio de Factores Edáficos que afectan la Biodisponibilidad de cadmio en el cultivo de alfalfa. Tesis para optar el título de Biólogo. UNALM. Lima.
127. Vegas, U. 1982. Evaluación de fosfato bruto Bayóvar y otras fuentes fosfatadas a dos niveles de Materia Orgánica con la rotación Papa- Maíz en condiciones de invernadero. Tesis para optar el título de Ing. Agrónomo. UNALM. Lima- Perú.
128. Villagarcía, S. 1990. Manual de uso de fertilizantes. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
129. Ward, NI. 1995. Trace elements. Environmental Analytical Chemistry. Ed. By FW Fifield and P.J. Haines. Capman.
130. Webb, J.R. y J.T. PESEK. 1958. An evaluation of phosphorus fertilizers varying in water solubility. I. Hill applications for corn. Soilsci. Soc. Am. Proc. 22: 533-538.
131. Weber, J; Karczewska, A. 2004. Biogeochemical processes and the role of heavy metals in the soil environment. Geoderma. 122: 105-107.

132. WHO. 1992. Cadmium environmental health criteria 134. United Nations Environmental Programme. International labour organization and world health organization. 280 p.
133. WHO. 1992. Cadmium environmental aspects, environmental health, criteria 135. United Nations Environmental Programme. International labour organization and world health organization. 165 p.
134. Widman, F., Herrera, F., Cabañas, D. 2005. El uso de composta proveniente de residuos sólidos municipales como mejorador de suelos para cultivos de Yucatán. México.
135. Zapater, J. 1961. Estudio de invernadero sobre la asimilación del fósforo del superfosfato por el maíz, trigo, alfalfa y lechuga. Tesis de Ing. Agrónomo UNALM. Lima, Perú.
136. Zenk, M. 1996. Heavy metal detoxification in higher plants. *Gene* 179: 21-30.
137. Zheljzkov, V.D., & Warman, P.R. 2004. Source-separated municipal solid waste compost application to Swiss Chard and Basil. *Journal of Environmental Quality*. 33, 542-552.

## **VII. ANEXOS**

**ANEXO 1: Materia seca de plantas de maíz en diferentes fuentes y dosis de fuentes fosfatadas en suelo franco arenoso**

Tratamientos		Materia Seca (g/planta)		
		Foliar	Radicular	Total
T1R1	200 ppm de Fosfato diamónico	23.73	11.63	35.36
T1R2		21.55	10.83	32.38
T1R2		21.64	9.15	30.79
T2R1	100 ppm de Fosfato diamónico	12.57	8.25	20.82
T2R2		11.58	6.63	18.21
T2R3		10.91	6.76	17.67
T3R1	50 ppm de Fosfato diamónico	10.28	5.84	16.12
T3R2		9.6	5.39	14.99
T3R3		9.76	5.18	14.94
T4R1	200 ppm de Roca Fosfórica acidulada con Ácido Sulfúrico	7.72	4.82	12.54
T4R2		7.6	3.04	10.64
T4R3		7.18	3.86	11.04
T5R1	100 ppm de Roca Fosfórica acidulada con Ácido Sulfúrico	5.89	2.02	7.91
T5R2		5.7	2.62	8.32
T5R3		5.56	2.45	8.01
T6R1	50 ppm de Roca Fosfórica acidulada con Ácido Sulfúrico	5.71	2.32	8.03
T6R2		5.79	2.54	8.33
T6R3		5.44	2.23	7.67
T7R1	0 ppm de Fuente de P	4.79	1.65	6.44
T7R2		5.82	2.47	8.29
T7R3		5.42	2.17	7.59

**ANEXO 2: Materia seca de plantas de maíz en diferentes fuentes y dosis de fuentes fosfatadas en suelo arenoso.**

Tratamientos		Materia Seca (g/planta)		
		Foliar	Radicular	Total
T1R1	200 ppm de Fosfato diamónico	24.17	13.48	37.65
T1R2		22.14	11.81	33.95
T1R2		23.09	14.65	37.74
T2R1	100 ppm de Fosfato diamónico	13.65	7.62	21.27
T2R2		12.26	7.92	20.18
T2R3		12.33	7.23	19.56
T3R1	50 ppm de Fosfato diamónico	13.27	7.32	20.59
T3R2		12.22	6.96	19.18
T3R3		11.83	7.1	18.93
T4R1	200 ppm de Roca Fosfórica acidulada con Ácido Sulfúrico	16.68	8.16	24.84
T4R2		15.39	7.54	22.93
T4R3		15.52	7.37	22.89
T5R1	100 ppm de Roca Fosfórica acidulada con Ácido Sulfúrico	8.73	5.46	14.19
T5R2		7.29	4.84	12.13
T5R3		7.71	5.5	13.21
T6R1	50 ppm de Roca Fosfórica acidulada con Ácido Sulfúrico	7.3	3	10.3
T6R2		6.27	3.38	9.65
T6R3		7.33	4.38	11.71
T7R1	0 ppm de Fuente de P	3.9	2.58	6.48
T7R2		2.63	1.43	4.06
T7R3		3.2	1.42	4.62

**ANEXO 3: Extracción y concentración de cadmio total de plantas de maíz con diferentes fuentes y dosis de fósforo, en suelo franco arenoso**

Tratamientos		Concentración Foliar mg Cd/kg M.S.	Concentración Foliar mg Cd/planta	Concentración Radicular mg Cd/kg M.S.	Concentración Radicular mg Cd/planta
T1R1	200 ppm de Fosfato diamónico	0.00095	0.0225435	0.003	0.03489
T1R2		0.00095	0.0204725	0.003	0.03249
T1R2		0.00095	0.020558	0.003	0.02745
T2R1	100 ppm de Fosfato diamónico	0.0011	0.013827	0.00695	0.0573375
T2R2		0.0011	0.012738	0.00695	0.0460785
T2R3		0.0011	0.012001	0.00695	0.046982
T3R1	50 ppm de Fosfato diamónico	0.0012	0.012336	0.0023	0.013432
T3R2		0.0012	0.01152	0.0023	0.012397
T3R3		0.0012	0.011712	0.0023	0.011914
T4R1	200 ppm de Roca Fosfórica acidulada con Ácido Sulfúrico	0.0017	0.013124	0.00685	0.033017
T4R2		0.0017	0.01292	0.00685	0.020824
T4R3		0.0017	0.012206	0.00685	0.026441
T5R1	100 ppm de Roca Fosfórica acidulada con Ácido Sulfúrico	0.00165	0.0097185	0.0027	0.005454
T5R2		0.00165	0.009405	0.0027	0.007074
T5R3		0.00165	0.009174	0.0027	0.006615
T6R1	50 ppm de Roca Fosfórica acidulada con Ácido Sulfúrico	0.00155	0.0088505	0.0031	0.007192
T6R2		0.00155	0.0089745	0.0031	0.007874
T6R3		0.00155	0.008432	0.0031	0.006913
T7R1	0 ppm de Fuente de P	0.0036	0.017244	0.00345	0.0056925
T7R2		0.0036	0.020952	0.00345	0.0085215
T7R3		0.0036	0.019512	0.00345	0.0074865

**ANEXO 4: Extracción y concentración de cadmio total de plantas de maíz con diferentes fuentes y dosis de fósforo, en suelo arenoso**

Tratamientos		Concentración Foliar mg Cd/kg M.S.	Concentración Foliar mg Cd/planta	Concentración Radicular mg Cd/kg M.S.	Concentración Radicular mg Cd/planta
T1R1	200 ppm de Fosfato diamónico	0.00125	0.0302125	0.00205	0.027634
T1R2		0.00125	0.027675	0.00205	0.0242105
T1R2		0.00125	0.0288625	0.00205	0.0300325
T2R1	100 ppm de Fosfato diamónico	0.00125	0.0170625	0.002	0.01524
T2R2		0.00125	0.015325	0.002	0.01584
T2R3		0.00125	0.0154125	0.002	0.01446
T3R1	50 ppm de Fosfato diamónico	0.00105	0.0139335	0.00205	0.015006
T3R2		0.00105	0.012831	0.00205	0.014268
T3R3		0.00105	0.0124215	0.00205	0.014555
T4R1	200 ppm de Roca Fosfórica acidulada con Ácido Sulfúrico	0.0014	0.023352	0.0026	0.021216
T4R2		0.0014	0.021546	0.0026	0.019604
T4R3		0.0014	0.021728	0.0026	0.019162
T5R1	100 ppm de Roca Fosfórica acidulada con Ácido Sulfúrico	0.0016	0.013968	0.00245	0.013377
T5R2		0.0016	0.011664	0.00245	0.011858
T5R3		0.0016	0.012336	0.00245	0.013475
T6R1	50 ppm de Roca Fosfórica acidulada con Ácido Sulfúrico	0.0023	0.01679	0.00335	0.01005
T6R2		0.0023	0.014421	0.00335	0.011323
T6R3		0.0023	0.016859	0.00335	0.014673
T7R1	0 ppm de Fuente de P	0.0017	0.00663	0.0027	0.006966
T7R2		0.0017	0.004471	0.0027	0.003861
T7R3		0.0017	0.00544	0.0027	0.003834

**ANEXO 5: Análisis de varianza de la materia seca foliar (g/pl.) en plantas de maíz en suelo arenoso**

Fuente de Variación	GL	SC	CM	Fcal		F0.05	F0.01
Tratamientos	6	773.874	128.979	224.52	**	2.85	4.46
Fuente	1	154.528	154.528	268.99	**	4.60	8.86
Dosis	2	360.843	180.422	314.07	**	3.74	6.51
Fuente x Dosis	2	4.777	2.389	4.16	*	3.74	6.51
Factorial vs testigo	1	253.726	253.726	441.67	**	4.60	8.86
Error	14	8.043	0.574				
Total	20	781.917					
C.V.(%)			6.446				
Promedio			11.758				

\* Significación al 0.05 de probabilidad

\*\* Significación al 0.01 de probabilidad

**ANEXO 6: Análisis de varianza de la materia seca radicular (g/pl.) en plantas de maíz en suelo arenoso**

<b>Fuente de Variación</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>Fcal</b>		<b>F0.05</b>	<b>F0.01</b>
Tratamientos	6	243.9350286	40.656	82.43	**	2.85	4.46
Fuente	1	65.97175556	65.972	133.76	**	4.60	8.86
Dosis	2	88.42307778	44.212	89.64	**	3.74	6.51
Fuente x Dosis	2	8.35527778	4.178	8.47	**	3.74	6.51
Factorial vs testigo	1	81.18491746	81.185	164.60	**	4.60	8.86
Error	14	6.9050667	0.493				
Total	20	250.8400952					
C.V.(%)			10.59878				
Promedio			6.62619				

\* Significación al 0.05 de probabilidad

\*\* Significación al 0.01 de probabilidad

**ANEXO 7: Análisis de varianza de la materia seca foliar (g/pl.) en plantas de maíz en suelo franco arenoso**

<b>Fuente de Variación</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>Fcal</b>		<b>F0.05</b>	<b>F0.01</b>
Tratamientos	6	657.058981	109.510	278.11	**	2.85	4.46
Fuente	1	312.75005	312.750	794.25	**	4.60	8.86
Dosis	2	180.6414778	90.321	229.38	**	3.74	6.51
Fuente x Dosis	2	96.4490333	48.225	122.47	**	3.74	6.51
Factorial vs testigo	1	67.21841984	67.218	170.71	**	4.60	8.86
Error	14	5.5127333	0.394				
Total	20	662.5717143					
C.V.(%)			6.452054				
Promedio			9.725714				

\* Significación al 0.05 de probabilidad

\*\* Significación al 0.01 de probabilidad

**ANEXO 8: Análisis de varianza de la materia seca radicular (g/pl.) en plantas de maíz en suelo franco arenoso**

Fuente de Variación	GL	SC	CM	Fcal		F0.05	F0.01
Tratamientos	6	177.437	29.573	57.30	**	2.85	4.46
Fuente	1	106.3854222	106.385	206.12	**	4.60	8.86
Dosis	2	35.2078778	17.604	34.11	**	3.74	6.51
Fuente x Dosis	2	9.3107444	4.655	9.02	**	3.74	6.51
Factorial vs testigo	1	26.53295556	26.533	51.41	**	4.60	8.86
Error	14	7.226	0.516				
Total	20	184.663					
C.V.(%)			14.81301				
Promedio			4.85				

\* Significación al 0.05 de probabilidad

\*\* Significación al 0.01 de probabilidad

**ANEXO 9: Análisis de varianza de la extracción de cadmio foliar (mg de Cd/planta) en plantas de maíz en suelo arenoso.**

Fuente de Variación	GL	SC	CM	Fcal		F0.05	F0.01
Tratamientos	6	0.00100322	0.0001672	135.00	**	2.85	4.46
Fuente	1	0.00002467	0.0000247	19.92	**	4.60	8.86
Dosis	2	0.00049694	0.0002485	200.61	**	3.74	6.51
Fuente x Dosis	2	0.00007209	0.0000360	29.10	**	3.74	6.51
Factorial vs testigo	1	0.00040952	0.0004095	330.64	**	4.60	8.86
Error	14	0.00001734	0.0000012				
Total	20	0.00102056					
C.V.(%)			6.815087				
Promedio			0.016331				

\* Significación al 0.05 de probabilidad

\*\* Significación al 0.01 de probabilidad

**ANEXO 10: Análisis de varianza de la extracción de cadmio radicular (mg de C/planta) en plantas de maíz en suelo arenoso.**

Fuente de Variación	GL	SC	CM	Fcal		F0.05	F0.01
Tratamientos	6	0.00087389	0.00014565	50.69	**	2.85	4.46
Fuente	1	0.00007405	0.00007405	25.77	**	4.60	8.86
Dosis	2	0.00039889	0.00019945	69.41	**	3.74	6.51
Fuente x Dosis	2	0.00002372	0.00001186	4.13	*	3.74	6.51
Factorial vs testigo	1	0.00037724	0.00037724	131.28	**	4.60	8.86
Error	14	0.00004023	0.00000287				
Total	20	0.00091412					
C.V.(%)			11.10179				
Promedio			0.015269				

\* Significación al 0.05 de probabilidad

\*\* Significación al 0.01 de probabilidad

**ANEXO 11: Análisis de varianza de la extracción de cadmio foliar (mg de C/planta) en plantas de maíz en suelo franco arenoso.**

Fuente de Variación	GL	SC	CM	Fcal		F0.05	F0.01
Tratamientos	6	0.00040341	0.00006724	74.94	**	2.85	4.46
Fuente	1	0.00011202	0.00011202	124.86	**	4.60	8.86
Dosis	2	0.0001582	0.00007910	88.17	**	3.74	6.51
Fuente x Dosis	2	0.00002689	0.00001345	14.99	**	3.74	6.51
Factorial vs testigo	1	0.00010631	0.00010631	118.50	**	4.60	8.86
Error	14	0.00001256	0.00000090				
Total	20	0.00041597					
C.V.(%)			6.901924				
Promedio			0.013725				

\* Significación al 0.05 de probabilidad

\*\* Significación al 0.01 de probabilidad

**ANEXO 12: Análisis de varianza de la extracción de cadmio radicular (mg de C/planta) en plantas de maíz en suelo franco arenoso.**

Fuente de Variación	GL	SC	CM	Fcal		F0.05	F0.01
Tratamientos	6	0.00495604	0.0008260	61.26	**	2.85	4.46
Fuente	1	0.00145022	0.0014502	107.55	**	4.60	8.86
Dosis	2	0.00141145	0.0007057	52.34	**	3.74	6.51
Fuente x Dosis	2	0.00149779	0.0007489	55.54	**	3.74	6.51
Factorial vs testigo	1	0.00059659	0.0005966	44.24	**	4.60	8.86
Error	14	0.00018878	0.0000135				
Total	20	0.00514483					
C.V.(%)			18.0988				
Promedio			0.020289				

\* Significación al 0.05 de probabilidad

\*\* Significación al 0.01 de probabilidad

**ANEXO 13: Prueba de Homogeneidad de Errores**

Item	Tipo de suelo	CM del error	Homogeneidad	
Materia seca foliar	Arena	0.574	1.4589	Sí
Materia seca foliar	Franco arenoso	0.394		
Materia seca radicular	Arena	0.493	0.9559	Sí
Materia seca radicular	Franco arenoso	0.516		
Extracción de Cd foliar	Arena	0.333	0.9583	Sí
Extracción de Cd foliar	Franco arenoso	0.347		
Extracción de Cd radicular	Arena	0.080	0.6206	Sí
Extracción de Cd radicular	Franco arenoso	0.129		

\*Prueba de homogeneidad de las matrices de variancia (M. de Box).

**ANEXO 14: Análisis de varianza de la materia seca foliar (g/pl.) en plantas de maíz con diferentes dosis y fuentes de fósforo y dos tipos de suelo.**

Fuente de Variación	GL	SC	CM	Fcal		F0.05	F0.01
Suelo	1	66.6128028	66.613	137.60	**	4.20	7.64
Fuente	1	453.477025	453.477	936.71	**	4.20	7.64
Dosis	2	525.5263722	262.763	542.77	**	3.34	5.45
Suelo x Dosis	2	15.9582056	7.979	16.48	**	3.34	5.45
Suelo x Fuente	1	13.801225	13.801	28.51	**	4.20	7.64
Fuente x Dosis	2	70.30995	35.155	72.62	**	3.34	5.45
Suelo x Fuente x Dosis	2	30.9163167	15.458	31.93	**	3.34	5.45
Testigo	1	6.615	6.615	13.66	**	4.20	7.64
Factorial vs testigo	1	291.0670194	291.067	601.23	**	4.20	7.64
Error	28	13.555267	0.484				
Total	41	1487.839183					
C.V.(%)			6.477				
Promedio			10.74167				

\* Significación al 0.05 de probabilidad

\*\* Significación al 0.01 de probabilidad

**ANEXO 15: Análisis de varianza de extracción de cadmio en la materia seca de la parte foliar (mg de Cd/planta) con diferentes dosis, fuentes de fósforo y dos tipos de suelo en la bioacumulación de cadmio en plantas de maíz.**

Fuente de Variación	GL	SC	CM	Fcal		F0.05	F0.01
Suelo	1	0.0002554	0.0002554	239.17	**	4.20	7.64
Fuente	1	0.00012091	0.0001209	113.23	**	4.20	7.64
Dosis	2	0.00060539	0.0003027	283.46	**	3.34	5.45
Suelo x Dosis	2	0.00004974	0.0000249	23.29	**	3.34	5.45
Suelo x Fuente	1	0.00001578	0.0000158	14.78	**	4.20	7.64
Fuente x Dosis	2	0.0000849	0.0000425	39.75	**	3.34	5.45
Suelo x Fuente x Dosis	2	0.00001408	0.0000070	6.59	**	3.34	5.45
Testigo	1	0.00028245	0.0002825	264.50	**	4.20	7.64
Factorial vs testigo	1	0.00004926	0.0000493	46.13	**	4.20	7.64
Error	28	0.0000299	0.0000011				
Total	41	0.00150782					
C.V.(%)			6.876867				
Promedio			0.015028				

\* Significación al 0.05 de probabilidad

\*\* Significación al 0.01 de probabilidad

**ANEXO 16: Análisis de varianza de extracción de cadmio en la materia seca de la parte radicular (mg de Cd/planta) con diferentes dosis, fuentes de fósforo y dos tipos de suelo en la bioacumulación de cadmio en plantas de maíz.**

<b>Fuente de Variación</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>Fcal</b>		<b>F0.05</b>	<b>F0.01</b>
Suelo	1	0.00026891	0.00026891	32.88	**	4.20	7.64
Fuente	1	0.00108983	0.00108983	133.25	**	4.20	7.64
Dosis	2	0.00134704	0.00067352	82.35	**	3.34	5.45
Suelo x Dosis	2	0.00046329	0.00023165	28.32	**	3.34	5.45
Suelo x Fuente	1	0.00043444	0.00043444	53.12	**	4.20	7.64
Fuente x Dosis	2	0.00065601	0.00032801	40.10	**	3.34	5.45
Suelo x Fuente x Dosis	2	0.0008655	0.00043275	52.91	**	3.34	5.45
Testigo 1 vs Testigo 2	1	0.00000826	0.00000826	1.01	n.s.	4.20	7.64
Factorial vs testigo	1	0.00096131	0.00096131	117.53	**	4.20	7.64
Error	28	0.00022901	0.00000818				
Total	41	0.0063236					
C.V.(%)			16.08569				
Promedio			0.017779				

\* Significación al 0.05 de probabilidad

\*\* Significación al 0.01 de probabilidad

**ANEXO 17: Análisis de varianza de efectos simples de la materia seca foliar (g/pl.) en plantas de maíz con diferentes dosis y fuentes de fósforo y dos tipos de suelo.**

<b>Fuente de Variación</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>Fcal</b>		<b>F0.05</b>	<b>F0.01</b>
Dosis en FDA x Arena	2	222.324267	111.1621335	229.618	**	3.34	5.45
Dosis en FDA x FrancoA	2	270.470489	135.2352445	279.344	**	3.34	5.45
Dosis en RocaF x Arena	2	143.296067	71.6480335	147.997	**	3.34	5.45
Dosis en RocaF x FrancoA	2	6.620022	3.310011	6.837	**	3.34	5.45
Fuente en 50 x Arena	1	44.936067	44.936067	92.821	**	4.2	7.64
Fuente en 50 x FrancoA	1	26.881667	26.881667	55.527	**	4.2	7.64
Fuente en 100 x Arena	1	35.090017	35.090017	72.483	**	4.2	7.64
Fuente en 100 x FrancoA	1	53.46135	53.46135	110.431	**	4.2	7.64
Fuente en 200 x Arena	1	79.27935	79.27935	163.761	**	4.2	7.64
Fuente en 200 x FrancoA	1	328.856067	328.856067	679.291	**	4.2	7.64
Suelo en FDA x 50	1	9.8304	9.8304	20.306	**	4.2	7.64
Suelo en FDA x 100	1	1.6854	1.6854	3.481	n.s.	4.2	7.64
Suelo en FDA x 200	1	1.025067	1.025067	2.117	n.s.	4.2	7.64
Suelo en RocaF x 50	1	2.6136	2.6136	5.399	*	4.2	7.64
Suelo en RocaF x 100	1	7.216067	7.216067	14.906	**	4.2	7.64
Suelo en Roca F x 200	1	104.918017	104.918017	216.721	**	4.2	7.64
Error combinado	28	13.555267	0.484116679				

\* Significación al 0.05 de probabilidad

\*\* Significación al 0.01 de probabilidad

**ANEXO 18: Efectos simples de la extracción de cadmio en la materia seca foliar (mg de Cd/planta) en plantas de maíz con diferentes dosis y fuentes de fósforo y dos tipos de suelo.**

Fuente de Variación	GL	SC	CM	Fcal		F0.05	F0.01
Dosis en FDA y Arena	2	0.000428	0.000214	200.401	**	3.34	5.45
Dosis en FDA y FrancoA	2	0.000158	0.000079	73.980	**	3.34	5.45
Dosis en RocaF y Arena	2	0.000141	0.0000705	66.020	**	3.34	5.45
Dosis en RocaF y FrancoA	2	0.00002745	0.000013725	12.853	**	3.34	5.45
Fuente en 50 y Arena	1	0.000013154	0.000013154	12.318	**	4.2	7.64
Fuente en 50 y FrancoA	1	0.000014449	0.000014449	13.531	**	4.2	7.64
Fuente en 100 y Arena	1	0.000016111	0.000016111	15.087	**	4.2	7.64
Fuente en 100 y FrancoA	1	0.000017574	0.000017574	16.457	**	4.2	7.64
Fuente en 200 y Arena	1	0.000067496	0.000067496	63.207	**	4.2	7.64
Fuente en 200 y FrancoA	1	0.000107	0.000107	100.201	**	4.2	7.64
Suelo en FDA y 50	1	0.000002182	0.000002182	2.043	n.s.	4.2	7.64
Suelo en FDA y 100	1	0.000014211	0.000014211	13.308	**	4.2	7.64
Suelo en FDA y 200	1	0.000089521	0.000089521	83.832	**	4.2	7.64
Suelo en RocaF y 50	1	0.000079301	0.000079301	74.262	**	4.2	7.64
Suelo en RocaF y 100	1	0.000015586	0.000015586	14.596	**	4.2	7.64
Suelo en Roca F y 200	1	0.000134	0.000134	125.485	**	4.2	7.64
Error	28	0.0000299	0.0000010679				

\* Significación al 0.05 de probabilidad

\*\* Significación al 0.01 de probabilidad

**ANEXO 19: Efectos simples de la extracción de cadmio en la materia seca radicular (mg de Cd/planta) en plantas de maíz con diferentes dosis y fuentes de fósforo y dos tipos de suelo.**

Fuente de Variación	GL	SC	CM	Fcal		F0.05	F0.01
Dosis en FDA y Arena	2	0.000308	0.000154	18.829	**	3.34	5.45
Dosis en FDA y FrancoA	2	0.002115	0.0010575	129.296	**	3.34	5.45
Dosis en RocaF y Arena	2	0.000115	0.0000575	7.030	**	3.34	5.45
Dosis en RocaF y FrancoA	2	0.000794	0.000397	48.539	**	3.34	5.45
Fuente en 50 y Arena	1	0.000010096	0.000010096	1.234	n.s.	4.2	7.64
Fuente en 50 y FrancoA	1	0.000041417	0.000041417	5.064	*	4.2	7.64
Fuente en 100 y Arena	1	0.000007775	0.000007775	0.951	n.s.	4.2	7.64
Fuente en 100 y FrancoA	1	0.002871	0.002871	351.024	**	4.2	7.64
Fuente en 200 y Arena	1	0.000079899	0.000079899	9.769	**	4.2	7.64
Fuente en 200 y FrancoA	1	0.000035274	0.000035274	4.313	*	4.2	7.64
Suelo en FDA y 50	1	0.000006173	0.000006173	0.755	n.s.	4.2	7.64
Suelo en FDA y 100	1	0.001833	0.001833	224.112	**	4.2	7.64
Suelo en FDA y 200	1	0.000027963	0.000027963	3.419	n.s.	4.2	7.64
Suelo en RocaF y 50	1	0.00003298	0.00003298	4.032	n.s.	4.2	7.64
Suelo en RocaF y 100	1	0.000063811	0.000063811	7.802	**	4.2	7.64
Suelo en Roca F y 200	1	0.000068682	0.000068682	8.397	**	4.2	7.64
Error	28	0.00022901	0.00000818				

\* Significación al 0.05 de probabilidad

\*\* Significación al 0.01 de probabilidad

**ANEXO 20: Extracción Total de Cadmio por planta promedio en los diferentes niveles de fósforo aplicado (mg Cd/planta).**

<b>Niveles de P (ppm)</b>	<b>Cd Aplicado (ppm)</b>	<b>Extracción Planta (mg Cd/planta)</b>
0	2.86	0.009218
50	2.11	0.012028
100	2.46	0.016934
200	2.48	0.02384

**ANEXO 21: Extracción Total de Cadmio por planta promedio en las diferentes fuentes de fósforo aplicado (mg Cd/planta).**

<b>Fuentes de P (ppm)</b>	<b>Cd Aplicado (ppm)</b>	<b>Extracción Planta (mg Cd/planta)</b>
Sin fuente de P	2.86	0.0092
Roca fosfórica acidulada con Ácido Sulfúrico	2.60	0.4514
Fosfato diamónico	2.10	0.0213

**ANEXO 22: Extracción Total de Cadmio por planta promedio en los dos distintos tipos de suelo (mg Cd/planta).**

<b>Tipos de suelo</b>	<b>Cd Aplicado (ppm)</b>	<b>Extracción Planta (mg Cd/planta)</b>
Franco Arenoso	2.86	0.0170
Arenoso	1.98	0.0158