



**UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA  
COMISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO  
DOCTORADO EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**



**EVALUACIÓN DE LAS FRACCIONES DE FÓSFORO Y DEL CONTENIDO DE  
CADMIO EN SUELOS ÁCIDOS FERTILIZADOS CON FOSFATOS POR  
LARGOS PERIODOS Y SU ABSORCIÓN POR EL ARROZ**

Neudis Subero Mata  
C.I.:10217510  
Tutor: Dr. Ricardo Ramírez

Maracay, febrero de 2013.

**A mi familia, pilar de apoyo de mi vida**

## AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la fortaleza para culminar este trabajo

Al Fonacit por el financiamiento otorgado para el alcance esta meta

Al Ciepe por toda la ayuda prestada para la realización del muestreo

A La Universidad Central de Venezuela, por brindarme sus instalaciones para la realización de la investigación y por la formación académica impartida.

A la Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería y al Departamento de Química por el apoyo recibido durante la realización de la investigación

Al Prof. Ricardo Ramírez, mi tutor, por su valiosa amistad y por todas las horas académicas dedicadas a este trabajo.

A la Dra. Zulay Niño y a el Dr. Roberto Villafañe, asesores académicos de este trabajo.

A los profesores Susana Araya y Aouiqw Ascanio por su asesoría en la parte estadística.

A mi familia por el apoyo incondicional y sus palabras de aliento en todo momento.

Al Ing. Julio Parra y a la MSc. Omaira Sequera por todos los momentos que compartimos en el Laboratorio de Biología y Fertilidad de Suelos

A mis compañeros de trabajo, por su apoyo durante el desarrollo de la investigación.

A mis amigos por su aliento continuo para la culminación de este trabajo.

A todas las personas de que uno u otra forma colaboraron para el desarrollo del trabajo.

## RESUMEN

El fraccionamiento de fósforo en suelos arroceros del Sistema de Riego del Río Guárico permitió conocer los reservorios de P de inmediata, mediana y baja disponibilidad para las plantas. Actualmente el diagnóstico del requerimiento de fósforo para el cultivo de arroz en estos suelos se hace usando soluciones extractoras calibradas; pero no se conocía la contribución de las formas de fósforo del suelo al fósforo disponible. En este trabajo se evaluó la distribución de las fracciones de fósforo en 43 suelos del Sistema de Riego del Río Guárico, cultivados con arroz y fertilizados con fosfatos por períodos de tiempo de 5, 10, 30, 40 y 50 años y se relacionaron éstas fracciones de P con el contenido de Cd, Ca y Zn en el suelo, con el P en la planta y con el tiempo de fertilización; además se determinó el contenido de Cd en los suelos y se relacionó con el Cd en la planta, Ca, Zn en el suelo y tiempo de fertilización. Las muestras de suelos se colectaron a una profundidad de 0-20 cm, se secaron al aire y se tamizaron con una malla de 2 mm. Las plantas muestreadas se dividieron en rastrojo (tallo y hojas), cascarilla y grano, se molieron, se tamizaron con malla de 1 mm. y se mineralizaron; en el extracto se determinó Cd y P. En el suelo el pH se midió con una relación suelo:agua 1:2,5, el cadmio intercambiable se extrajo con DTPA. El método de fraccionamiento de fósforo en el suelo utilizado fue el desarrollado por Tiessen y Moir, (1993). La determinación de Cd en tejido y suelo se realizó por ICP. Mediante el fraccionamiento de P se determinó que en 26 suelos predominan las formas inorgánicas con más del 80 % del P total presente. En 35 suelos de los 43 evaluados mostraron que el P soluble y lábil resultó inferior a 10 % y el P adsorbido fue inferior a 35 % en 21 suelos. En 32 suelos se encontró que más de la mitad del P total está en forma no disponible en el suelo. Las fracciones inorgánicas y orgánicas de P en el suelo no se correlacionaron con el Cd en el suelo ni con los años de fertilización fosfatada. La fracción inorgánica de P extraída con bicarbonato se correlacionó con el P en la planta. El P en la planta de arroz se correlacionó significativamente ( $p \leq 0,05$ ) con el P disponible por los métodos de Bray I y Mehlich III; sin embargo, no se encontró una relación lineal entre éstos. Todos los valores de Cd disponible encontrados en los suelos están por debajo del valor crítico de  $0,8 \text{ mg.kg}^{-1}$  (Guía de Protección Ambiental de la Comunidad Europea, 1995). El contenido de Cd en tejido presentó el siguiente orden: Cd grano > Cd cascarilla > Cd rastrojo. No se encontró correlación significativa ( $p \leq 0,05$ ) entre el Cd en la planta, Cd en el grano de arroz y el Cd intercambiable del suelo. En ninguna de las muestras de grano de arroz se encontró contenidos de Cd mayores al límite máximo permisible de  $0,4 \text{ mg.kg}^{-1}$  (FAO/OMS 2007). La información obtenida muestra que la fertilización continua con fosfatos, por períodos de tiempo entre 5 y 50 años no ha tenido un impacto significativo sobre los niveles de Cd en la planta de arroz.

**Palabras claves:** Fraccionamiento de fósforo, suelos arroceros, cadmio, fertilización fosfatada

## ABSTRACT

Fractionation of phosphorus in rice soils Irrigation System Guarico River reservoirs could get your P of immediate, medium and low availability to plants. Currently the diagnosis of phosphorus requirement for rice cultivation in these soils is calibrated using extracting solutions, but did not know the contribution of soil phosphorus forms phosphorous available. This study evaluated the distribution of phosphorus fractions in 43 soils River Irrigation System Guarico rice cultivated and fertilized with phosphates for periods of 5, 10, 30, 40 and 50 and these fractions were related of P with Cd content, Ca and Zn in the soil, with the P in the plant and in time of fertilization, also determined the Cd content in soils and was related to the plant Cd, Ca, Zn at the time of fertilization and soil. Soil samples were collected at a depth of 0-20 cm, were air dried and sieved with a mesh size of 2 mm. The sampled plants were divided into stubble (stem and leaves) and grain hulls, ground, sieved with 1 mm mesh. and mineralized; in the extract was determined Cd and P. In the soil pH was measured with a ratio soil: water 1:2.5, cadmium extracted by DTPA interchangeable. The method of fractionation of phosphorus in the soil used was developed by Tiessen and Moir, (1993). The determination of Cd and ground tissue was performed by ICP. By splitting P was determined that in 26 soils predominate inorganic forms over 80% of the total P present. In 35 of the 43 tested soils showed that soluble and labile P was less than 10% and P adsorbed was less than 35% in soil 21. In 32 soils was found that more than half of the total P is in no way available soil. Inorganic and organic fractions of soil P were not correlated with Cd in the soil or in the years of fertilization. The inorganic fraction of P extracted with bicarbonate correlated with P in the plant. The P in the rice plant was significantly correlated ( $p \leq 0.05$ ) with the P available methods Bray I and Mehlich III, but not found a linear relationship between them. All available Cd values found in soils are below the critical value of  $0.8 \text{ mg.kg}^{-1}$  (Environmental Handbook of the European Community, 1995). The Cd content in tissue presented the following order: Cd grain > Cd husks > Cd stubble. No significant correlation was found ( $p \leq 0.05$ ) between the Cd in plant, Cd in rice grain and soil exchangeable Cd. In none of the samples was found rice grain Cd content higher than the maximum permissible limit of  $0.4 \text{ mg.kg}^{-1}$  (FAO / WHO 2007). The information obtained shows that continuous fertilization with phosphates, for periods between 5 and 50 years has not had a significant impact on the levels of Cd in the rice plant.

KEY WORDS Fractionation of phosphorus, rice soils, cadmium, phosphorus fertilization

## INDICE GENERAL

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
INDICE GENERAL	vi
INDICE DE CUADROS	x
INDICE DE FIGURAS	xii
INTRODUCCIÓN	1
HIPOTESIS	4
OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECIFICOS	4
CAPÍTULO I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
1.1 El Fósforo	5
1.1.1 El ciclo del fósforo	6
1.1.2 El fósforo en el suelo	7
1.1.2.1 El Fósforo inorgánico	8
1.1.2.2 El Fósforo orgánico	11
1.1.3 Movilidad del P en el suelo	12
1.1.4 Suelos inundados	13
1.1.4.1 Suelos inundados	13
1.1.4.2. Fósforo en los suelos inundados	14
1.1.5 Determinación de fósforo en el suelo	15
1.1.5.1 Fraccionamiento de fósforo	15
1.1.5.2 Fraccionamiento de fósforo en suelos Venezolanos	21
1.1.5.3. Análisis de fósforo disponible	23
1.1.6 El fósforo en la planta de arroz	26
1.2 Impacto de la fertilización fosfatada continúa sobre el cadmio en el suelo	27
1.3. El Cadmio	30

1.3.1. Propiedades	30
1.3.2. El cadmio en el suelo	31
1.3.3. Origen de la contaminación por cadmio en el suelo	34
1.3.4. Factores del suelo que afectan la acumulación del cadmio y su disponibilidad	35
1.3.5. Cadmio en plantas	40
<b>CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>42</b>
2.1. Selección de las parcelas	42
2.2. Muestreo de suelos	42
2.3 Muestreo de plantas	43
2.4. Análisis químico de los suelos	43
2.5. Fraccionamiento de P del suelos	43
2.6 Determinación de cadmio y zinc en el suelo	47
2.7. Análisis de Material Vegetal	48
2.7.1. Determinación de fósforo	48
2.7.2. Determinación de cadmio y zinc	49
2.8. Análisis estadístico	49
<b>CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>51</b>
3.1 Análisis fisicoquímico de los suelos	51
3.1.2 Correlaciones entre las distintas variables de suelos	55
3.2. Fraccionamiento de P en los suelos evaluados	56
3.2.1 Fósforo Inorgánico (Pi)	57
3.2.2 Fósforo orgánico (Po)	60
3.3. Distribución porcentual de las fracciones de P en el suelo	64
3.3.1. Análisis de Varianza multivariado (MANOVA)	66
3.3.2. Fracciones inorgánicas	65
3.3.2.1..Efecto del pH sobre la distribución de las fracciones de Pi	65
3.3.2.2.Efecto del calcio sobre la distribución porcentual de las	67

fracciones de Pi en el suelo	
3.3.2.3.Efecto de la materia orgánica sobre la distribución de las fracciones de Pi en el suelo	69
3.3.2.4.Efecto de los años de fertilización fosfatada sobre la distribución de las fracciones de Pi en el suelo	71
3.3.3. Fracciones de P orgánicas (Po)	74
3.3.3.1.Efecto del pH sobre la distribución porcentual de Po en el suelo	75
3.3.3.2.Efecto del contenido de calcio sobre la distribución porcentual del Po en el suelo	77
3.3.3.3.Efecto de la materia orgánica sobre la distribución de las fracciones de Po en el suelo	79
3.3.3.4.Efecto de los años de fertilización fosfatada sobre la distribución porcentual de las fracciones de Po en el suelo	80
3.3.4 Relaciones entre las fracciones de Pi y Po	82
3.3.5. Relaciones entre las fracciones de Pi y las variables de suelos	88
3.3.6. Relaciones entre las fracciones de Po y las variables de suelos	93
3.4 Fosforo disponible en los suelos evaluados	94
3.4.1. Relaciones entre los distintos métodos de P disponible	100
3.4.2. Correlaciones entre P Olsen, P Bray I, P Mehlinch III y las variables de suelos	103
3.4.3. Relaciones entre las fracciones de Pi y el P disponible en el suelo	105
3.4.4. Relaciones entre las fracciones de Po y el P disponible en el suelo	110
3.5. Cadmio en el suelo	110
3.5.1.Relaciones entre el Cd disponible y las variables de suelo	113
3.5.2. Relaciones entre el Cd disponible y las formas de P en el suelo	115
3.6. Evaluación del contenido de P en planta	119
3.6.1. Distribución del contenido de P en la planta	121



3.6.2. Relaciones entre el contenido de P en la planta y las distintas formas de P en el suelo	122
3.7. Determinación de cadmio en el follaje de la planta de arroz	124
3.7.1. Distribución del cadmio en el follaje de la planta de arroz	127
3.7.2. Correlaciones entre el cadmio en el follaje de la planta arroz y algunas variables de suelo	130
CONCLUSIONES	133
BIBLIOGRAFÍA	134
ANEXOS	149

## INDICE DE CUADROS

<b>CAPITULO I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>Pág.</b>
Cuadro 1.1 Constantes de equilibrio de complejos de Cd (Fuente: Willard et al., 1978)	32
<b>CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	
Cuadro 2.1: Fracciones extraídas de acuerdo al método de Tiessen y Moir, (1993).	46
Cuadro 2.2: Valores de los límites de detección y cuantificación obtenidos para los metales analizados	48
<b>CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	
Cuadro 3.1: Resultados promedio de los análisis de los suelos	53
Cuadro 3.2: Correlaciones significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre las variables de Suelo; utilizando el programa Infostat	56
Cuadro 3.3: Fracciones de fósforo inorgánico en los 43 suelos evaluados	58
Cuadro 3.4: Fracciones de fósforo orgánico en los 43 suelos evaluados	61
Cuadro 3.5: Relaciones para $p \leq 0,05$ de las fracciones de Pi con el Al, pH, Arcilla, materia orgánica, Zn, Capacidad de intercambio y Ca de los suelos	88
Cuadro 3.6: Correlaciones para $p \leq 0,05$ entre las fracciones de PoML, PoLL, PoO con el pH, materia orgánica, Zn, capacidad de intercambio y Ca de los suelos	94
Cuadro 3.7: Fósforo disponible en suelo con los distintos métodos evaluados	94
Cuadro 3.8: Coeficientes de correlación ( $p \leq 0,05$ ) entre los distintos métodos de extracción de fósforo disponible en el suelo.	100
Cuadro 3.9: Coeficientes de correlación ( $p \leq 0,05$ ) entre P disponible por Bray I y	104

Mehlich III y pH, arcilla, MO, CIC y calcio.	
Cuadro 3.10: Coeficientes de correlaciones ( $p \leq 0,05$ ) entre el P soluble en agua, P Olsen, P Bray I, PMehlich III y fracciones inorgánicas PiR, PiL, PiML, PiLL, PiO y PiRC	105
Cuadro 3.11: Coeficientes de correlación ( $p \leq 0,05$ ) entre el P disponible por Olsen, soluble en agua y las fracciones de PoL, PoLL y PoO	110
Cuadro 3.12: Valores promedio de cadmio disponible en el suelo ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ).	111
Cuadro 3.13: Coeficientes de correlación ( $p \leq 0,05$ ) entre el Cd disponible en suelo y el pH, Ca, Zn, MO, CIC y arcilla de los suelos	113
Cuadro 3.14: Coeficientes de correlación para $p \leq 0,05$ entre el Cd disponible en suelo y las formas de Pi en el suelo.	115
Cuadro 3.15: Porcentaje de P en el grano, cascarilla, rastrojo y planta de arroz	119
Cuadro 3.16: Coeficientes de correlación ( $p \leq 0,05$ ) entre el P absorbido por la planta ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) con el P Bray I y P Mehlich III.	123
Cuadro 3.17: Coeficientes de correlación ( $p \leq 0,05$ ) entre el P absorbido por la planta y el PiL	123
Cuadro 3.18. Años de fertilización fosfatada y contenido de Cd en el grano, en la cascarilla, en el rastrojo y en la planta de arroz.	125
Cuadro 3.19 Distribución por grupos del Cd en las diferentes partes del follaje	127

## INDICE DE FIGURAS

<b>CAPITULO I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>Pág.</b>
Figura 1.1: Representación esquemática del ciclo de P en el suelo. Fuente: Havlin et al., 1999.	6
Figura 1.2: Influencia del pH en la distribución de especies ortofosfatos en solución. Fuente: Havlin et al., 1999	8
Figura 1.3: Mecanismo de adsorción del P en la superficie de los óxidos de Fe/Al. Fuente: Havlin et al., 1999.	10
Figura 1.4 Contribución relativa de las diferentes fuentes de Cd al suelo. Fuente: Rodríguez et al., 2008.	35
Figura 1.5. Distribución de las especies acuosas de Cd según el pH del suelo. Fuente: EPA-U.S., 1999.	37
Figura 1.6. Formación de complejos de esfera interna y externa. Fuente: Scheidegger et al., 1996.	39
<b>CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	
	<b>Pág</b>
Figura 3.1. Valores de pH de los suelos bajo cultivo de arroz en el Estado Guárico	51
Figura 3.2. Valores de zinc disponible de los suelos bajo cultivo de arroz en el estado Guárico	53
Figura 3.3 Distribución porcentual de las diferentes fracciones de Pi en los cuatro grupos de pH: 3,52-5,02; 5,02-5,52; 5,52-6,02 y 6,02-7,02	66
Figura 3.4 Distribución porcentual de las diferentes fracciones de Pi con respecto a los cuatro grupos de Ca disponible en el suelo	68
Figura 3.5 Distribución porcentual de las diferentes fracciones de Pi en los cuatro	70

grupos de MO: 1,65-2,15%; 2,15-2,65%; 2,65-3,15% y 3,15-4,15 %.	
Figura 3.6 Distribución porcentual de las diferentes fracciones de Pi con respecto a los años de fertilización fosfatada en el rango: 5-17, 17-29, 29-31 y de 41-53 años	72
Figura 3.7 Distribución porcentual de las diferentes fracciones de Po en los cuatro rangos de pH: 3,52-5,02; 5,02-5,52; 5,52-6,02 y 6,02-7,02	75
Figura 3.8 Distribución porcentual de las diferentes fracciones de Po con respecto a en los cuatro grupos de Ca disponible en el suelo	77
Figura 3.9 Distribución porcentual de las diferentes fracciones de Po con respecto a cuatro grupos de MO en el suelo	80
Figura 3.10 Distribución porcentual de las diferentes fracciones de Po con respecto a los años de fertilización fosfatada en el rango: 5-17, 17-29, 29-31 y de 41-53 años	81
Figura 3.11 Distribución del Pi y Po en las fracciones L, ML, LL y O	83
Figura 3.12 Distribución del Pi total y del Po total en los suelos evaluados	84
Figura 3.13 Fracciones de fósforo soluble y lábil, adsorbido y P ocluido y residual en 43 suelos del Sistema de Riego del Río Guárico, de acuerdo a la disponibilidad para la planta	86
Figura 3.14 Regresiones lineales entre: (A) PiO y % arcilla y (B) PiRC y % arcilla	89
Figura 3.15 Regresiones lineales entre el PiRC y la MO	91
Figura 3.16 Relación entre fracción de PiRC y el Ca disponible en el suelo	93
Figura 3.17 Distribución de los niveles de disponibilidad de P Olsen	97
Figura 3.18 Distribución de los niveles de disponibilidad de P Bray I	98
Figura 3.19 Regresiones lineales entre: (A) P Bray I y P Mehlich III y (B) P Olsen y P Mehlich III	102
Figura 3.20 Relaciones entre P Olsen y las fracciones de Pi: A: PiR, C: PiL, B: PiML y D: PiLL.	106
Figura 3.21 Relación entre la fracción de PiL y el P por el método de Mehlich III	107
Figura 3.22 Relación entre la fracción de PiLy el P disponible por el método	108

de Bray I.	
Figura 3.23 Relación entre el PiRy el P soluble en agua	109
Figura 3.24 Valores de cadmio disponible en suelo	112
Figura 3.25 Relación entre el cadmio disponible en suelo y PiT en los suelo del Sistema de Riego del Río Guárico	116
Figura 3.26 Relación entre el Cd disponible y las fracciones de Pi no disponibles	118
Figura 3.27 Distribución porcentual del contenido de P en el follaje de la planta de arroz	122
Figura 3.28 Distribución del Cd en muestras que sólo contenían Cd en cascarilla y rastrojo	128
Figura 3.29 Distribución del Cd en el follaje de las plantas evaluadas	129
Figura 3.30 Distribución del Cd en muestras que sólo contenían Cd en cascarilla y rastrojo	130
Figura 3.31 Relación entre el Cd en el grano de arroz y el calcio disponible en el suelo	131

## INTRODUCCIÓN

El arroz es el cereal de mayor importancia en el mundo por la alta proporción de superficie total de siembra, el número de personas que económicamente dependen de su cultivo, procesamiento y mercadeo y, por la proporción que representa en la alimentación humana, si se compara con el trigo y el maíz (Páez, 2004).

En Venezuela, la condición de suelos inundables abarca alrededor de 18,5 millones de hectáreas, lo cual representa el 20 % del territorio nacional (Comerma y Paredes, 1978). Estos suelos pueden tener atributos favorables para la producción de arroz.

El arroz está muy arraigado en el hábito alimentario de la población venezolana y representa el segundo cultivo de importancia económica en el rubro de cereales; contribuyendo con una producción de 1.043,067 t para el año 2010 (FAO, 2010). Se consideran como tierras aptas para su cultivo cerca de 3,7 millones de ha, ubicadas fundamentalmente en los estados Portuguesa, Guárico, Barinas, Cojedes y Apure (Páez, 2004).

En Venezuela el arroz se cultiva en la época de secano y temporal, ambas bajo condiciones de inundación; esta característica del cultivo influye en forma determinante en la mecánica de aporte de los elementos del suelo y de los fertilizantes, para la nutrición mineral del arroz (Álvarez, 1997).

En los suelos arroceros se incrementa la disponibilidad del fósforo para ser aprovechado por la planta, debido a las condiciones de inundación que éstos presentan, lo que reduciría la necesidad de aplicación de elevadas dosis de este nutriente en los campos que han sido fertilizados anteriormente (Álvarez, 1997). Sin embargo, algunas veces los agricultores aplican dosis altas.

Actualmente no se conoce con seguridad, en el país, las formas de P presentes en los suelos ácidos cultivados con arroz. La fertilización de estos suelos con fosfatos por largos periodos

de tiempo posiblemente ha ocasionado la inmovilización de parte del fósforo en diferentes formas químicas, las cuales pueden influir en su disponibilidad para las plantas. La determinación del fósforo disponible en el suelo ha sido objeto de investigación durante más de cien años; sin embargo, no existe un método universal para su estimación, lo cual ha generado el desarrollo de diferentes soluciones extractoras de P, usando diferentes sustancias de acuerdo con las características de los suelos (Pérez, 1995).

La aplicación continua de fertilizantes fosfatados puede dar origen a la acumulación del cadmio (Cd) en el suelo (Smolders et al. 1999); lo que pudiera permitir su absorción por el arroz.

El cadmio es uno de los elementos de mayor interés a estudiar, debido a su toxicidad potencial en arroz y más importante aún es su toxicidad en humanos a través de la cadena alimenticia. El cadmio puede ser absorbido por la planta a través del sistema de radical. Liu et al., (2007) manifiestan que es muy importante minimizar la producción de granos de arroz en suelos contaminados por Cd, para así reducir el riesgo de toxicidad en humanos. De allí la importancia de investigar sobre el contenido de cadmio en suelos arroceros Venezolanos.

Actualmente el diagnóstico del requerimiento de fósforo para el cultivo de arroz en un suelo dado se hace utilizando soluciones extractoras, por las cuales se obtiene fósforo disponible, pero no se conocen las formas de fósforo del suelo que puedan contribuir al fósforo disponible. Este conocimiento permitiría mejorar los métodos de diagnóstico de fósforo disponible para la planta así como los programas de fertilización.

Existen numerosos trabajos en los que se hace referencia al fraccionamiento del fósforo en suelos cultivados durante muchos años, con aplicaciones sucesivas de fertilizantes fosfatados (Guo et al., (2000), Beck y Sánchez, (1994), Zhang y Mackenzie, (1997), Schmidt et al., (1996)). Las diferentes formas y distribución de P en suelos Venezolanos han sido estudiados por Westin y Brito (1969), Hernández y López (1997), Hernández y Bautis (2005); sin embargo, hay muy poca información sobre los efectos de la aplicación



continua de estos fertilizantes sobre la distribución y cuantificación de las fracciones orgánicas e inorgánicas en suelos ácidos inundados, además de conocer si ésta fertilización continua con fosfatos está contribuyendo a la contaminación del suelo y el cultivo con cadmio.

Con este trabajo se pretende determinar la cantidad de fósforo en cada fracción de los suelos ácidos cultivados con arroz seleccionados y relacionar cada forma con la absorción de este nutriente a las plantas; además, diagnosticar la situación actual del cadmio disponible en el suelo y su contenido en la planta.

## **HIPÓTESIS**

La aplicación de fosfatos a los suelos ácidos, bajo cultivo de arroz en el Sistema de Riego del Río Guárico, por largos períodos de tiempo pudo dar origen a diferentes formas disponibles y no disponibles de fósforo, además de generar un incremento gradual del cadmio disponible en los suelos con sus consecuencias en el grano de arroz. La determinación de las formas de fósforo puede servir de indicador de las reservas actuales de fósforo disponible.

## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar las fracciones de fósforo y el contenido de cadmio en suelos ácidos fertilizados con fosfatos por largos períodos y su absorción por el arroz.

### **Objetivos Específicos**

1. Relacionar las formas de fósforo y el contenido de cadmio en el suelo con los años de fertilización.
2. Relacionar el cadmio en la planta, en especial en el grano, con el cadmio, fósforo, calcio y zinc en el suelo.
3. Relacionar el fósforo absorbido por la planta con las formas de fósforo en el suelo
4. Relacionar el fósforo de la fracción resina y el determinado por los métodos de Olsen, Bray I y Mehlich III con el fósforo absorbido por la planta.

## CAPÍTULO I

### REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 1.1.El Fósforo

Símbolo químico P, número atómico 15, peso atómico 30,9738. El fósforo forma la base de gran número de compuestos, de los cuales los más importantes son los fosfatos. En todas las formas de vida, los fosfatos desempeñan un papel esencial en los procesos de transferencia de energía, como el metabolismo, la fotosíntesis, la función nerviosa y la acción muscular (Lenntech, 2011).

Los huesos fueron la fuente original de fósforo en la fabricación de fertilizante fosfatado. Actualmente, la única fuente importante de fósforo para la industria de los fertilizantes es el mineral fosfato. El compuesto de fosfato en estos depósitos es la apatita, que tiene la fórmula general  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_6(\text{Cl}, \text{OH})_2$ . Este mineral se halla en diversas formas: carbonatos, fluorapatita, cloroapatita o hidroxapatita. El mineral es tratado con calor ó con ácidos, para romper el enlace apatita, y transformar al fósforo contenido en más soluble (Tisdale y Nelson, 1991).

El P en el suelo es menos abundante que el nitrógeno o el potasio. El P total de los suelos varía entre 0,05 y 0,2 %; mientras que el P disponible representa el 1% del P total (Bravo, 2000). Desafortunadamente, la cantidad de P total en lo suelos no siempre se relaciona con su disponibilidad para las plantas. La comprensión de las relaciones e interacciones de las diversas formas de P en los suelos y los numerosos factores que influyen en su disponibilidad de P es esencial para un manejo eficiente de este nutriente (Havlin et al., 1999).

### 1.1.1 El ciclo del fósforo

La figura 1.1 muestra las interrelaciones entre varias formas de P en suelo. La disminución en la concentración del P en la solución del suelo por la absorción de P por las raíces de las plantas es tamponada por las fracciones de P inorgánicos y orgánico. Los minerales primarios y secundarios son las fuentes principales que suplen  $\text{H}_2\text{PO}_4^-/\text{HPO}_4^{2-}$  en solución del suelo. El P adsorbido sobre los minerales y superficies de arcillas también puede desorberse para tamponar la disminución del P en la solución. Además se cuenta con mineralización de los residuos de plantas mediante la actividad microbial (Havlin et al., 1999).

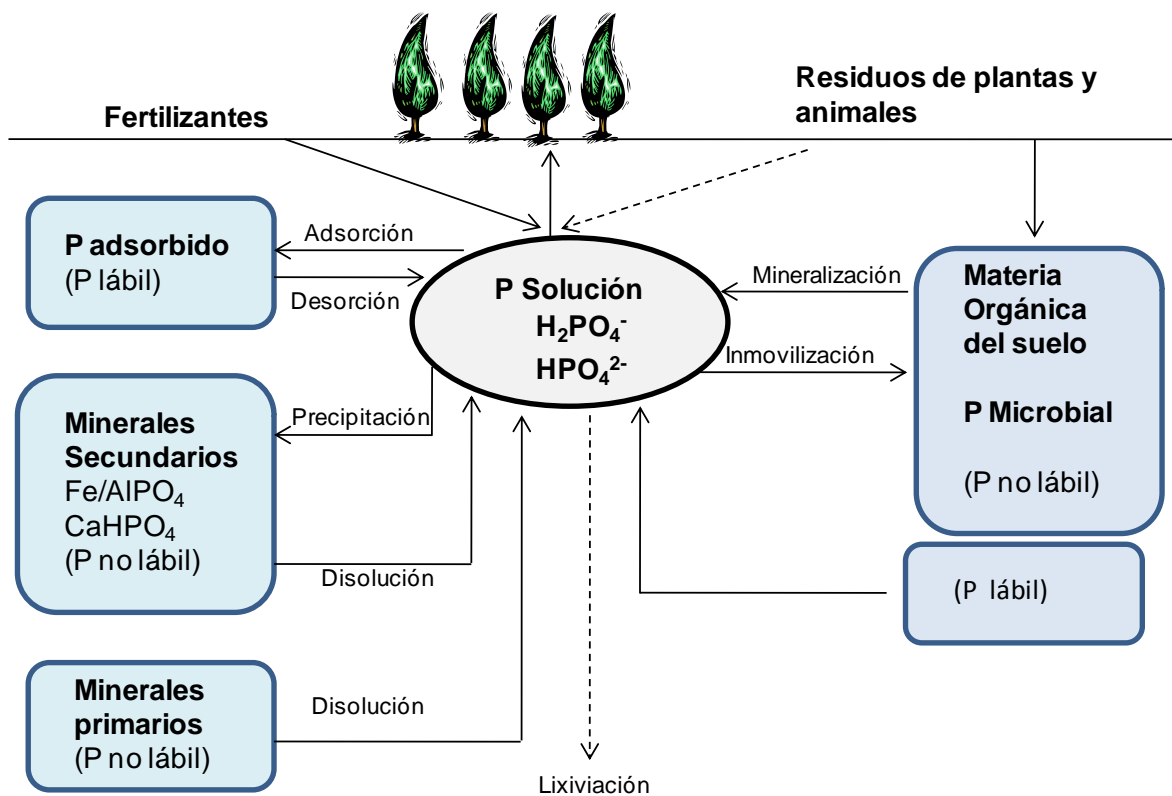


Figura 1.1: Representación esquemática del ciclo de P en el suelo. Fuente: Havlin et al., 1999.

Al aplicar el fertilizante soluble en agua, éste rápidamente se disuelve y se incrementa la concentración de P en la solución del suelo. De nuevo, las fracciones inorgánicas y orgánicas pueden buferear el incremento de P en la solución. Además de la absorción del P por las raíces, el P de la solución puede ser adsorbido en la superficie de los minerales y precipitado como un mineral secundario. Los microorganismos inmovilizan el P de la solución como P microbial, produciendo eventualmente compuestos de P rápidamente mineralizable (P orgánico lábil) y compuestos de P orgánicos más resistentes a la degradación microbial (Figura 1.1).

El mantenimiento de la concentración de P en la solución (intensidad) para una adecuada nutrición de P en la planta depende de la habilidad del P lábil (cantidad) para reemplazar el P en la solución del suelo que ha sido absorbido por la planta. La relación entre los factores intensidad y cantidad se llama capacidad buffer; la cual expresa la habilidad relativa del suelo para tamponar los cambios en la solución del suelo. A mayor capacidad buffer, mayor es la habilidad para mantener la concentración de P en la solución del suelo. El ciclo del P puede ser simplificado de acuerdo a la siguiente relación: P en la solución del suelo  $\rightleftharpoons$  P lábil  $\rightleftharpoons$  P no lábil; donde el P lábil y no lábil representan tanto la fracción inorgánica como la orgánica (Havlin et al., 1999).

### **1.1.2 El fósforo en el suelo**

El fósforo en el suelo está en dos formas, orgánico (Po) e inorgánico (Pi). A diferencia del nitrógeno, el Pi es mayor que el Po, con la excepción de aquellos suelos orgánicos. La fracción de Po se encuentra en el humus y en otros materiales orgánicos que pueden o no asociarse con él. La fracción inorgánica de P forma numerosas combinaciones con el hierro, aluminio, calcio, flúor y otros elementos. Esos compuestos son poco solubles en agua, lo que disminuye la disponibilidad del P para las plantas; en algunos casos forma con arcillas compuestos insolubles (Stevenson, 1986).

### 1.1.2.1 Fósforo inorgánico:

El fósforo inorgánico se puede dividir en el P en la solución del suelo (fase líquida) y el fósforo en la fase sólida; el cual corresponde al P retenido o adsorbido y al fijado o precipitado en el suelo. (Bravo, 2000)

**Fósforo Disuelto:** Es el P que está en la solución del suelo. Representa la fracción más pequeña de todas y es la única aprovechable por la planta (P disponible). Este Pi se encuentra en forma de aniones de fosfato monoácido ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) y diácido ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) (Fuentes, 1999). La cantidad de los iones fosfato monoácido y diácido presentes en la solución del suelo depende del pH (Figura 1.2).

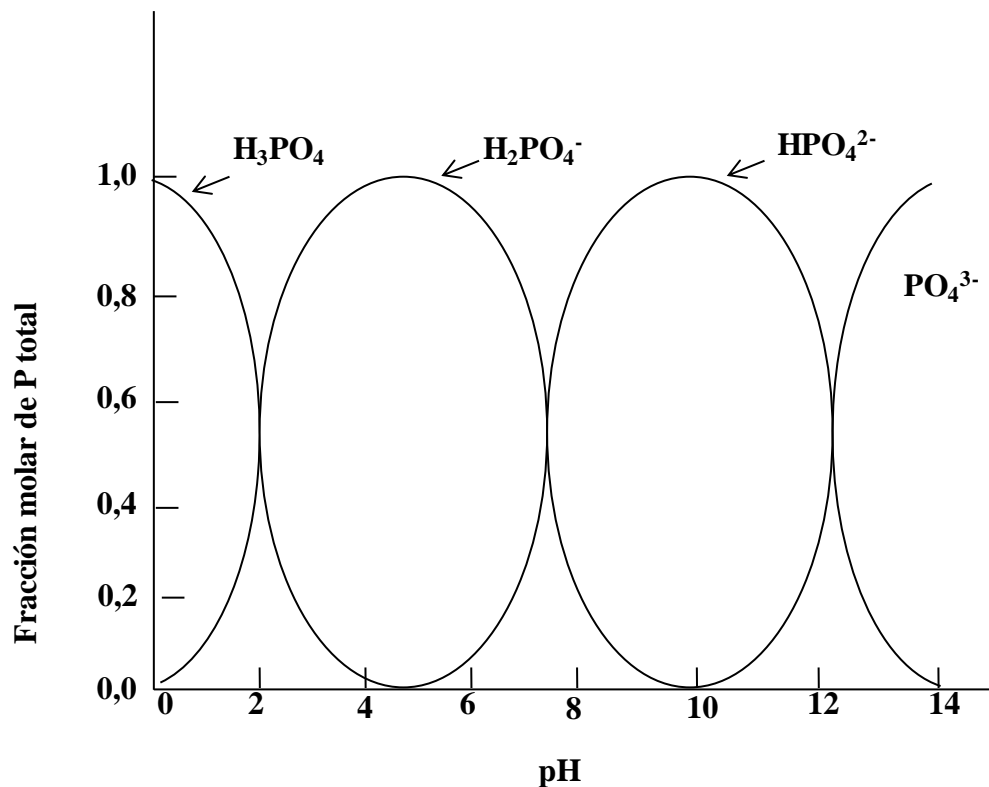


Figura 1.2: Influencia del pH sobre la distribución de las especies de ortofosfatos en solución del suelo. Fuente: Havlin et al., 1999.

A pH 7,2 hay aproximadamente igual cantidad de las formas  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{HPO}_4^{2-}$ , por debajo de ese pH el ion  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  es la forma principal en la solución del suelo, mientras que a pH por encima de 7,2 la forma predominante es  $\text{HPO}_4^{2-}$ . La absorción por la planta de  $\text{HPO}_4^{2-}$  es mucho más lenta que la de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ . El promedio de la concentración de P en la solución del suelo es sobre 0,05 ppm y varía ampliamente entre los suelos (Havlin et. al., 1999).

Cuando la concentración de P en la solución baja, debido a la absorción por la planta, es repuesto por la fracción lábil. En caso contrario, cuando se incorpora un abono fosfatado se incrementa la concentración de P de la solución; para que la concentración de iones se mantenga constante es preciso que el exceso de iones de la solución sea adsorbido por el complejo. (Fuentes, 1999).

**Fósforo Adsorbido por el complejo arcillo-húmico:** es la fracción intercambiable que repone el fósforo que se consume en la solución del suelo. En suelos bien provistos de arcilla, humus y con pH estable y cercano a la neutralidad la cantidad de fósforo intercambiable es alta.

El P inorgánico lábil ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y/o  $\text{HPO}_4^{2-}$ ), se adsorbe en la superficie mineral (Figura 1.3), en los suelos ácidos, los óxidos e hidróxidos de Fe y Al son los minerales primarios involucrados en la adsorción del Pi. Debido a que la solución del suelo es ácida, la superficie de estos minerales tiene una carga neta positiva, aunque existen sitios positivos y negativos. La predominancia de cargas positivas rápidamente atrae a  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y a otros aniones. El ion P adsorbido en la superficie de los óxidos de Al/Fe por interacción con los grupos  $\text{OH}^-$  y/o  $\text{OH}_2^+$  en la superficie mineral se muestra en la figura 1.3 (Havlin et al., 1999).

Cuando el ion ortofosfato está enlazado a través de un enlace Al-O-P (Figura 1.3), el  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  es considerado lábil y puede ser rápidamente desorbido de la superficie mineral a la solución del suelo. Cuando el  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  se une a dos enlaces Al-O, se forma un anillo de seis

miembros estable (Figura 1.3); en consecuencia la desorción es más difícil y el  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  es considerado no lábil (Havlin et al., 1999).

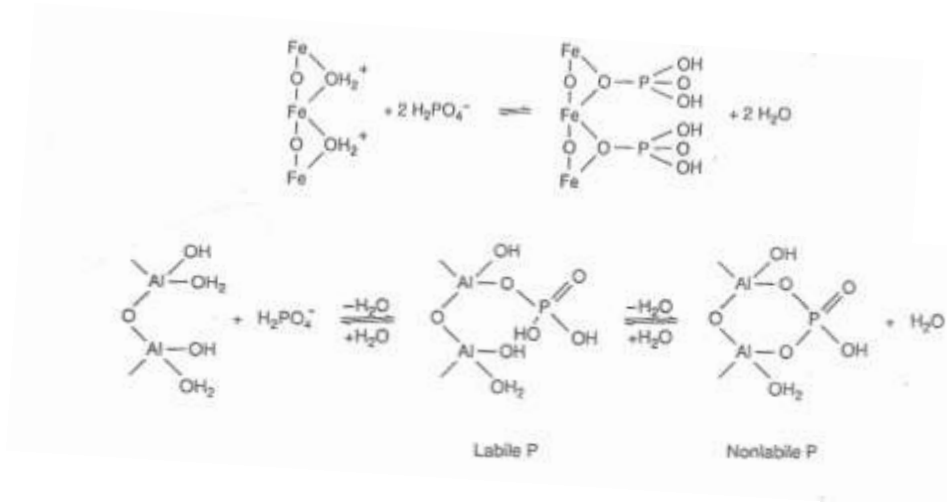


Figura 1.3: Mecanismo de adsorción del Pi lábil en la superficie de los óxidos de Fe/Al. Fuente: Havlin et al., 1999.

**Fósforo Precipitado:** es el que forma parte de los minerales primarios y secundarios y constituye la gran reserva de fósforo en el suelo. La insolubilización del P se puede deber a la precipitación como fosfatos cálcicos en medio alcalino, o como fosfatos de hierro y aluminio en medio ácido. Tanto en suelos ácidos como alcalinos, el fósforo tiende a sufrir una cadena de reacciones que producen compuestos fosforados de baja solubilidad. Por lo tanto, durante el largo tiempo que el fósforo permanece en el suelo, las formas menos solubles, y por ende las menos disponibles para la planta, tienden a aumentar. Cuando se agrega fósforo soluble al suelo, usualmente ocurre una reacción inicial de unas pocas horas que remueve el fósforo de la solución (fija el fósforo). Las lentas reacciones posteriores continúan gradualmente reduciendo la solubilidad durante meses o años, según la edad de los compuestos fosfatados. El fósforo recientemente fijado puede ser débilmente soluble y de algún valor para las plantas. Con el tiempo, la solubilidad del fósforo fijado tiende a



decrecer a niveles extremadamente bajos, este fenómeno se conoce como envejecimiento del fósforo (Sanzano, 2011).

### **1.1.2.2 Fósforo Orgánico:**

En los suelos el fósforo orgánico existe en tres formas principales: fosfolípidos, ácidos nucleicos y fosfato de inositol, su contribución a la cantidad total de fósforo asimilable es muy pequeña. Estas formas de fósforo orgánicas se mineralizan, liberando el P disponible para el uso de las plantas (Tisdale y Nelson, 1991). La mineralización del Po se efectúa por especies de bacterias, hongos y actinomicetos. El P orgánico representa del 20 al 60 % del fósforo del suelo y procede de los restos vegetales y animales y se acumula en las capas superficiales; (Fuentes, 1999).

La relación carbono/fósforo condiciona el proceso de la mineralización de la materia orgánica para la liberación de P disponible, de tal forma que se produce liberación de fósforo cuando esa relación es inferior a 300 (Fuentes, 1999). La mineralización del Po ha sido estudiada en relación a la proporción del C:N:P en el suelo, indicándose una proporción C:N:P de 100:10:1 para la materia orgánica del suelo, pero han sido hallados valores que fluctúan desde 229:10:0,39 hasta 71:10:3,05. Actualmente, se ha sugerido que si la proporción carbono: fósforo inorgánico es de 200:1, o menor, ocurrirá la mineralización del P, y que si la proporción es de 300:1 ocurrirá la inmovilización (Tisdale y Nelson, 1991).

En un estudio realizado por Turner, (2006) en una serie de suelos de Madagascar, se encontró que el P orgánico podría tener importancia para la nutrición del arroz, debido a que las concentraciones de fosfatos disponibles para las plantas son extremadamente bajas, y además los fosfatos inorgánicos casi siempre tienen asociaciones estables con metales.

Frossard et al., (1989) reportaron que algunos compuestos de fósforo orgánico son retenidos con menor fuerza que los fosfatos inorgánicos, por lo que podrían ser de más fácil acceso para las raíces.

### **1.1.3 Movilidad del P en el suelo.**

El movimiento del P se realiza principalmente por difusión (movimiento de iones o moléculas de acuerdo a un gradiente de concentración), y en mucho menor medida por flujo masal (movimiento en el agua, inducido por la transpiración de la planta) ( Baber et al., 1963).

Los factores principales que influyen en el proceso de difusión son:

- Constante de solubilidad del P: es una propiedad química intrínseca del elemento
- Gradiente de concentración de P entre dos puntos considerados
- Distancia entre los puntos entre los que se realiza la difusión y tortuosidad del medio.
- Humedad: la difusión se realiza en medio acuoso, por lo que se transforma en un factor crítico.
- Temperatura: la difusión del P aumenta con el incremento de la temperatura.

La interacción entre los fosfatos aportados por el fertilizante y la fase sólida del suelo hace que el aprovechamiento inmediato del P aplicado sea realmente bajo. La eficiencia de fertilización varía según el tipo de suelo (pH y tipo de arcillas), fuente de fertilizante y técnica de aplicación, pero en términos generales, la eficiencia de la fertilización es muy reducida: alrededor de 10-20%. El P remanente queda en el suelo generando efectos residuales para cultivos posteriores. (Fertilizando, 2011).

## 1.1.4 Fósforo en suelos inundados

### 1.1.4.1 Suelos inundados

Desde el punto de vista edafológico, un suelo inundable es aquel que puede mantener un grado de sobresaturación durante un largo periodo de tiempo como para generar condiciones de reducción microbiológica (los microorganismos participan en la transferencia de electrones). Esta condición en el suelo se produce en suelos de textura arcillosa, reduciendo notablemente la tasa de infiltración del agua hasta el punto de crear condiciones de reducción, o cuando el perfil tiene una capa impermeable profunda que impide el libre paso del agua ocasionando inundación superficial. Ambas situaciones de suelo se pueden encontrar en Venezuela (Rivillo, 2006).

Cuando el suelo está inundado (condiciones anaeróbicas), los microorganismos usan el O<sub>2</sub> libre para sobrevivir y su concentración se reduce alrededor de dos días después de inundación. Mientras más tiempo pasa el suelo inundado menor es la cantidad de O<sub>2</sub> y mientras mayor sea la lámina de inundación de agua, menor será la cantidad de O<sub>2</sub> que se puede mover desde el atmósfera al suelo (Snyder y Slaton, 2011).

Una vez que un suelo es inundado, comienza a generarse una serie de procesos microbiológicos y químicos que producirán cambios sustanciales en las características físicas, químicas, y electroquímicas del suelo. Con una intensidad y magnitud que van a depender, entre otros factores: del tipo y naturaleza de la materia orgánica, microbiología y naturaleza del suelo (Rivillo, 2006).

En los suelos sumergidos, los cambios electroquímicos principales que influyen en la química y la fertilidad de los suelos y en el crecimiento de los cultivos como el arroz incluyen (Sahrawat, 2005):

- Una disminución en el potencial redox (Eh) o la reducción del suelo.
- Un aumento del pH en suelos ácidos y una disminución del pH en suelos alcalinos.

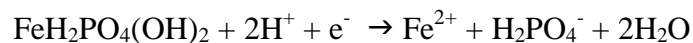
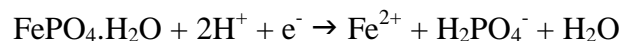
- Un aumento de la conductancia específica y la fuerza iónica de la solución del suelo.
- Los equilibrios iónicos influyen en las reacciones de adsorción–desorción y la disponibilidad de los principales micronutrientes.

#### 1.1.4.2 Fósforo en los suelos inundados

El fósforo en los suelos inundados se presenta tanto en forma inorgánica como en forma orgánica. La proporción relativa de cada forma depende del suelo, la vegetación y el uso del suelo. El Pi disuelto es considerado biodisponible, el Po en las partículas del suelo debe sufrir transformaciones inorgánicas antes de ser considerado biodisponible (Reddy et al., 1999).

Los mecanismos de liberación de fosfato en los suelos inundables pueden deberse: primero, a la reducción de los fosfatos férricos insolubles a formas solubles de fosfatos ferrosos; segundo, liberación de fosfatos ocluidos en óxidos hidratados superficiales; tercero, desplazamiento de los fosfatos de hierro y aluminio por aniones orgánicos; cuarto, hidrólisis de los fosfatos de hierro y aluminio, y quinto, intercambio aniónico de fosfatos entre arcillas y aniones orgánicos (Rivillo, 2006).

La fracción de fosfatos ocluidos de óxidos férricos hidratados no es disponible bajo condiciones de suelos bien drenados; en cambio en los suelos inundados, la liberación de fósforo por la reducción de los óxidos férricos a formas más solubles de óxidos ferrosos se representa mediante las siguientes reacciones químicas (Rivillo, 2006):



Al inicio, la inundación del suelo incrementa la concentración de P en la solución debido a la reducción del  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{2+}$  con la consecuente liberación del P fijado y coprecipitado en

los compuestos de Fe. La inundación también mejora la difusión, que es el mecanismo principal de suplemento de P a las raíces. Sin embargo, dos a cuatro semanas después de la inundación, al flujo inicial de P disponible le sigue un periodo donde se reduce la disponibilidad debido a la formación de fosfatos de Fe<sup>3+</sup> que precipitan el fósforo y a la adsorción de P en las partículas de arcilla y en los hidróxidos de Al. Esta reducción en la disponibilidad de P es más pronunciada en suelos que contienen altas cantidades de Fe y Al activo (Dobermann y Fairhurst, 2000).

Loeb et al. (2008) estudio la liberación de P en suelos bajo condiciones de inundación en los países bajos y en Polonia, encontrando que las concentraciones de P en la solución del suelo se elevó de 2 a 90 veces por el efecto de la inundación, con respecto a las concentraciones iniciales. Además encontraron que la liberación de P no estuvo relacionada con el origen geográfico de los suelos. Por otra parte, encontraron que, sólo una pequeña parte del hierro se reduce en aquellos suelos que contienen muy poca materia orgánica degradable.

Scalenghe *et al.* (2002) encontraron bajo condiciones de reducción, que el porcentaje máximo de solubilización de P se produjo entre 1 y 3 semanas y la concentración de P nunca excedió de 200 mol.dm<sup>-3</sup>. El potencial de liberación de P por reducción se correlacionó positivamente con la saturación del suelo con P. La solubilización de P bajo condiciones de reducción es probable que aumente en suelos sobrefertilizados con P.

### **1.1.5 Determinación de fósforo en el suelo**

#### **1.1.5.1. Fraccionamiento de Fósforo**

El fraccionamiento de fósforo permite conocer la disponibilidad de P en el corto y largo plazo, mediante la cuantificación de las fracciones de Pi y Po, pero no proporciona la composición estructural de las formas de P en el suelo (Turrión et al., 2001).

Para estudiar el fraccionamiento de P se han desarrollado diferentes esquemas, usando varios extrantantes que permiten cuantificar las diferentes formas químicas de P en el suelo (Jackson, 1958; Hedley et al., 1982; Tiessen y Moir, 1993).

Las distintas soluciones extraen el Pi y el Po, obteniendo al principio las formas más lábiles y finalmente las formas más resistentes. Se asume, básicamente, que cada fracción específica tiene un grado de disponibilidad similar en distintos suelos; esta presunción necesita ser verificada en distintos suelos y sistemas de manejo (Guo et al., 2000).

En general, el P lábil es conocido como asimilable para las comunidades vegetales y microbianas a corto plazo, porque es rápidamente desorbido de las superficies de las partículas del suelo. El P moderadamente lábil es considerado biológicamente asimilable en un lapso de tiempo intermedio, y el P ocluido es conocido como disponible en un período más largo (Cross & Schlesinger, 1995).

Chang y Jackson (1957), desarrollaron un procedimiento de fraccionamiento de fósforo, en el cual se midió cada una de las siguientes formas químicas: fosfato de aluminio, fosfato de hierro, fosfato de calcio y fósforo soluble; en este procedimiento se muestra que los tratamientos con  $\text{NH}_4\text{Cl}$  y  $\text{NaOH}$  deben preceder al tratamiento con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  debido a que este último remueve cantidades considerables de fosfato de hierro y aluminio, así como también todos los fosfatos de calcio.

El esquema de fraccionamiento desarrollado por Jackson (1958), y modificado por Petersen y Corey (1966) y Williams et al. (1967) es muy útil para cuantificar las fracciones de fósforo ligadas al Al, Fe y Ca. Muchos investigadores lo han usado en sus trabajos, como Westin y Brito, 1969 y López-Piñero y García-Navarro, 2001. Turrión *et al.* (2001) señalaron que los extractantes utilizados en la metodología de Chang y Jackson (1957) no son específicos para los compuestos de P que se pretenden extraer y se producen reabsorciones del P que es extraído en otras fracciones. Estos procedimientos han ignorado

el Po, habiéndose demostrado la importancia del mismo en la nutrición de las plantas, principalmente en suelos tropicales (Sharpley et al., 1989).

En los últimos quince años los procedimientos de extracción desarrollados por Hedley et al. (1982) y Tiessen et al. (1984) han sido los más utilizados y empleados por investigadores como Beck y Sánchez, (1994); Cross y Schlesinger, (1995); López et al. (2007), Fernández y Turrión (2011), entre otros. El fraccionamiento de Hedley también se utiliza para caracterizar las transformaciones de fósforo del suelo comparando suelos desarrollados en distintos ambientes u origen (Cross y Schlesinger, 1995; Tiessen et al, 1984) o bajo diferentes manejos (Guo y Yost, 1998; Hedley et al., 1982)

Hedley y colaboradores (1982), usaron el procedimiento de extracción secuencial para registrar pequeños cambios en el P del suelo en experimentos de incubación a corto plazo. Estos autores estudiaron los cambios en las fracciones de Pi y Po en un suelo cultivado con trigo por rotación durante 65 años, encontrando que el contenido de fósforo total en suelos cultivados con trigo fue 29 % menor que su análogo con pasto permanente. La principal pérdida de fósforo fue de 22 % en la forma de fósforo orgánico extraíble, y 52 % de la forma de fósforo estable.

Sharpley y Smith (1983), observaron que la aplicación de fósforo como fosfatos en cultivos tiende a incrementar el contenido total de Pi y disminuir el contenido de Po en el horizonte superior (0-30 cm), del suelo, por lo cual hay que considerar las formas inorgánicas y orgánicas.

Sharpley y Smith (1985), estudiaron las fracciones de Pi y Po en tres suelos no calcáreos y cinco calcáreos cultivados al menos por 15 años y en los suelos análogos vírgenes, con el objetivo de conocer si el reservorio del P en suelo estaba siendo alterado por los cultivos a largo plazo y por la aplicación de los fertilizantes. Estos autores encontraron que la cantidad de fertilizantes fosfatados aplicados afectó la mineralización e inmovilización del fósforo inorgánico en los suelos cultivados, lo cual estuvo relacionado con el índice de

sorción de fósforo en los suelos. Los resultados indicaron que los cultivos no tienen efecto sobre la distribución relativa del fósforo dentro de los pools orgánicos e inorgánicos en los cinco suelos calcáreos, pero los tres suelos no calcáreos exhibieron un incremento en el fósforo no ocluido y una disminución en el pools de fósforo ocluido.

Tiessen y Moir (1993), propusieron un método de fraccionamiento de P argumentando que el fraccionamiento original de Hedley et al. 1982 deja de extraer entre un 20 – 60 % fracciones de P en el suelo en un residuo que contiene cantidades significativas de fósforo orgánico, estas observaciones son consideradas en el esquema propuesto. Una de las diferencias más notables entre estos métodos consiste en que el método de Tiessen y Moir (1993), utilizó membranas de intercambio iónico, en lugar de resinas de intercambio iónico. Además, utilizó el HCl concentrado y caliente para extraer el P primario más fuertemente unido al Ca, que no se logra extraer con el HCl 1M. Hernández y Bautis (2005) señalaron esta fracción como Pi-ocluido o de los minerales primarios.

Beck y Sánchez (1994), usaron el esquema de fraccionamiento de Hedley et al. (1982) para estudiar los cambios en las fracciones de P en un suelo cultivado durante 18 años continuos con dos sistemas: fertilizado y no fertilizado. Ellos encontraron en los suelos fertilizados que el Pi extraído con NaOH actúa como reserva, y la desorción es bastante rápida para mantener los altos niveles de P en la planta. Para este sistema, el pool de P inorgánico explica el 96 % de la variación en los niveles de P disponible. En sistemas sin fertilización el P orgánico fue la principal fuente de P disponible para la planta y explicó el 44 % de la variación de P disponible para la planta. El P disponible medido con la resina de intercambio aniónico dependió del residuo de cosecha. Estos investigadores mostraron la falta de estabilidad en los niveles de P orgánico en los primeros 10 años, por lo cual se requiere de experimentos a largo plazo para construir un modelo que explique los cambios en las fracciones de Po en los sistemas con fertilización y sin fertilización.

Cross y Schlesinger (1995) consideraron que el método de fraccionamiento secuencial de Hedley et al. (1982) puede ser usado para separar las formas orgánicamente enlazadas al



fósforo de las fracciones geoquímicamente enlazadas. Estos investigadores manifestaron que el P biológico incluye todas las fracciones orgánicas (Po del Bicarbonato, Po de NaOH, Po sonic.) las fracciones geoquímicas de fósforo incluyen las fracciones remanentes (Pi de Resina, Pi de Bicarbonato, Pi de NaOH, Pi sonic, Pi HCl y el Po y Pi en la fracción residual). Su análisis sugiere que los datos de fraccionamiento de P por el método de Hedley, pueden dar un índice útil de la relativa importancia de los procesos geoquímicos versus procesos biológicos en suelos de diferente desarrollo.

Schmidt et al. (1996), utilizaron el esquema de fraccionamiento de P desarrollado por Hedley et al. (1982), para determinar la dinámica del P intercambiable entre varias formas de P en un suelo bajo cultivo continuo. Ellos analizaron muestras de suelos donde no se aplicó fosfato y donde se aplicó fosfato durante 10 años con cultivo. Los autores encontraron diferencias significativas en cuatro de las nueve fracciones de P en el suelo: en la fracción resina,  $\text{NaHCO}_3$  inorgánico, NaOH inorgánico y orgánico.

Zhang y Mackenzie (1997), estudiaron los cambios en las fracciones de fósforo luego de 10 años de adición de fósforo inorgánico y estiércol al cultivo de maíz, además relacionaron las transformaciones de P en suelos cultivados por largos períodos, encontrando que los cambios observados en las fracciones de P están asociados tanto a la adición de P como fertilizante inorgánico como a la adición de estiércol. La adición de P inorgánico y estiércol tendió a promover la formación de fósforo orgánico menos lábil a expensas del fósforo orgánico más lábil. Cuando se adicionó fosfato inorgánico al suelo la mayoría de las fracciones de P se acumularon con el tiempo.

Guo y Yost (1998), aplicaron el esquema de fraccionamiento de P de Hedley et al. (1982), en ocho suelos tratados con cuatro niveles de P y sembrados con catorce cultivos consecutivos, luego las siete fracciones obtenidas fueron agrupados en tres pools discretos con respecto a su disponibilidad: el rápidamente disponible, el disponible reversiblemente y el levemente disponible. Los resultados indicaron que la disponibilidad del fósforo fue

mayor cuando fue adicionado a suelos ligeramente meteorizados que cuando fue adicionado en suelos altamente meteorizados.

Guo et al. (2000), examinaron las diferentes fracciones de P en ocho suelos cultivados, usando el método de fraccionamiento de P de Hedley et al. (1982), para luego comparar los cambios en las fracciones de P. Los resultados indicaron que el P extraído con resina y el P extraído con  $\text{NaHCO}_3$  fueron las fracciones más sensibles para la remoción por la planta en todos los suelos. La fracción de  $\text{Pi-NaOH}$  también disminuyó con la remoción por la planta en todos los suelos.

En los suelos ligeramente meteorizados las fracciones de  $\text{P-HCl}$  y P residual disminuyeron con el cultivo y fueron las fracciones principales de P, posiblemente actuaron como un buffer para el P de la resina y en el  $\text{Pi-NaHCO}_3$ . La disminución del P residual en respuesta a la planta, sugiere que en estos suelos el P residual podría contener el P disponible para la planta (Guo et al., 2000).

En suelos altamente meteorizados la fracción  $\text{Pi-NaOH}$  fue la fracción dominante, y disminuyó en respuesta a la remoción por la planta. Las fracciones de  $\text{Pi-NaOH}$  y el P-resina parecen estar en equilibrio. Cuando el P-resina y el  $\text{Pi-NaHCO}_3$  fueron altos la fracción de  $\text{Pi-NaOH}$  acumulada permaneció estable a pesar de la remoción por la planta; cuando el P-resina y el  $\text{Pi-NaHCO}_3$  fueron reducidos por la remoción de la planta, el  $\text{Pi-NaOH}$  disminuyó, y además decayó el P-resinas y el  $\text{Pi-NaHCO}_3$ . El  $\text{Pi-NaOH}$  parece actuar como un buffer para el P-resinas y el  $\text{Pi-NaHCO}_3$  para suelos altamente meteorizados. El P residual se acumuló con la remoción por la planta (Guo et al., 2000).

El P orgánico no es crítico para la disponibilidad en los ocho suelos cultivados que recibe una entrada alta de P. Cuando el Pi fue bajo la fracción de  $\text{Po-NaHCO}_3$  contribuye al P disponible del suelo. Sin embargo, una misma fracción de Po, difiere en disponibilidad en diferentes suelos. (Guo et al., 2000).

Solomon y Lehmann (2000), determinaron que el cultivo en un suelo semiárido del norte de Tanzania afecta claramente la fracción de  $P_i-NaHCO_3$ , seguida por  $P_i-NaOH$ , sugiriendo que esta última fracción también representa una fuente importante de P para la planta.

Ochwoh, et al. (2005), trabajaron con la extracción secuencial de P en dos suelos incubados con 0, 25, 50, 100, 150 y 200 mg  $P.Kg^{-1}$ , por 1, 60, 120, 180 y 240 días para determinar los cambios en: 1) P lábil y soluble, 2) P adsorbido y 3) P ocluido y residual en cada suelo, siguiendo el esquema de Tiessen y Moir (1993). Los resultados mostraron una recuperación cerca del 100 % del P adicionado, además encontraron que 30 a 60 % del P añadido se transformó en P menos lábil después de 1 día de incubación y 80 a 90 % después de 60 días. Las transformaciones fueron más notables en el suelo con 51% de arcilla que en el suelo de 19% de arcilla.

Fernández et al., (2006) determinaron las fracciones de P predominantes en un Entisol, un Alfisol y un Vertisol, y analizaron los cambios que se produjeron por uso citrícola, arrocero y pastoril, respectivamente. Encontrando que el cultivo de arroz bajo inundación produjo la disminución de la mayoría de las formas de fósforo en el Alfisol, aumentando sólo el fósforo inorgánico en microagregados y el orgánico residual, el suelo cultivado permaneció en condiciones de reducción durante la producción de arroz. En el Entisol hubo una disminución del P fácilmente disponible, siendo las fracciones moderadamente lábiles y las más resistentes, el reservorio del fertilizante agregado. La implantación de *Setaria* sp en el Vertisol sólo produjo aumento significativo del Po ocluido en los microagregados.

#### **1.1.5.2. Fraccionamiento de Fósforo en suelos Venezolanos**

Las diferentes formas y distribución de P en suelos Venezolanos han sido estudiados por varios investigadores: Westin y Brito (1969), usando la metodología de Chang y Jackson (1957), encontraron que los suelos ultisoles y oxisoles presentaron mayor proporción de formas de P ligadas al hierro; Hernández y López (1997), usando la metodología de Tiessen y Moir (1993), evaluaron la distribución de fósforo en una Sabana Trachypogon de

los llanos centrales sometidas a quema y pastoreo, el P se distribuyó en mayor proporción en formas de P no disponibles para la planta (66 %); lo cual se correlaciona con el alto grado de meteorización que presentan estos suelos; Hernández y Bautis (2005), usando la metodología de Tiessen y Moir (1993), evaluaron los cambios en las fracciones de P producidos en una plantación de pinos, en suelos de sabanas luego de 24 años de continua siembra, encontrándose un incremento de la fracción de P moderadamente lábil (Po-NaOH) y de Po total; por lo cual, el desarrollo forestal con pinares en Uverito ha tenido un bajo impacto sobre los diferentes reservorios de P, después de 24 años de siembra continua.

López et al. (2007) emplearon el fraccionamiento secuencial de P en el suelo de Hedley et al. (1982) para medir el impacto de la adición de tres fuentes diferentes de abono orgánico por 25 años en la cantidad y la partición de P biodisponible en suelos de sabana del Amazonas, encontrando que después de la fertilización, todas las fracciones de Pi y Po aumentaron significativamente. El aumento en el Pi-resina y Pi-HCl fue sorprendente, los cambios entre las fracciones de Po fueron mayores para las fracciones de Po-NaOH sonicadas y no sonificado. El incremento total de P fue más relevante en los suelos tratados con gallinaza (1194 mg.kg<sup>-1</sup> Pt) y menos relevante con compost (500 mg.kg<sup>-1</sup> Pt), el suelo enmendado con residuos de animales presentó un valor intermedio (851 mg.kg<sup>-1</sup> Pt).

Fernández y Turrión (2011) compararon dos métodos de fraccionamiento de P edáfico, (Hedley *et al.* (1982), modificado por Tiessen y Moir (1993) y el de Chang y Jackson (1957) modificado por Olsen y Sommers (1982)). Se realizó un experimento de incubación en dos suelos, un Ultisol de Lara y un Alfisol de Yaritagua, fertilizados con superphosphertil, roca fosfórica con vinaza (RFV), roca fosfórica natural (RFN) y superfosfato triple, con una dosis única de 200 mg P kg<sup>-1</sup>suelo. Las fertilizaciones fosfatadas estudiadas en este trabajo incrementaron sólo las fracciones inorgánicas del P del suelo, tanto en el Ultisol como en el Alfisol. El procedimiento de Tiessen y Moir (1993) permitió realizar un estudio más detallado de la distribución del P en el suelo, ya que incluyó, a diferencia del procedimiento de Olsen y Sommers (1982), las fracciones P extraída con la membrana de intercambio aniónico y P extraído con NaHCO<sub>3</sub>, que además

fueron las más disponibles para la vegetación y estuvieron entre las afectadas por la aplicación de los fertilizantes fosfatados.

Los estudios de fraccionamientos de P realizados en Venezuela son pocos, unos dirigidos a evaluar la sostenibilidad a largo plazo en sistemas de bajos insumos, en otros se estudia (invernaderos) la partición del P luego de la aplicación de distintas fuentes de P al suelo, pero ninguno ha evaluado el impacto de las fertilizaciones fosfatadas por largos periodos de tiempo sobre las fracciones de P a nivel de campo, sobretodo en los suelos inundados del Guárico.

### **1.1.5.3 Análisis de fósforo disponible**

Los métodos para la determinación de fósforo disponible, en un contexto agronómico, miden las fracciones de P en el suelo que de alguna manera están relacionados con la porción de P que son usadas por la planta. El P disponible necesita ser definido con respecto a un receptor externo, como por ejemplo, una planta, una plantación o cultivos (Tiessen y Moir, 1993).

La determinación del fósforo disponible en el suelo ha sido objeto de investigación durante más de cien años; sin embargo, no existe un método universal para su estimación, lo cual ha generado el desarrollo de diferentes soluciones extractoras de P, usando diferentes sustancias de acuerdo con las características de los suelos (Pérez, 1995). Ramírez y Morales (1989), señalaron la necesidad de calibrar los métodos analíticos con respecto a la producción de un cultivo en condiciones de campo; ya que las características químicas y físicas tan diversas de los suelos no permiten la adopción de un método universal de extracción de P.

El método de Olsen ( $0,5 \text{ M NaHCO}_3$ ) fue desarrollado y usado en suelos calcáreos debido a que el bicarbonato precipita el calcio e incrementa la solubilidad del fósforo ligado al calcio. (Olsen y Sommers, 1982). Esta solución extractora es capaz de extraer también algo

del P proveniente de la superficie de los fosfatos de hierro y aluminio, más abundantes en suelos neutros y ácidos, siendo por ello también un buen extractante para un amplio rango de valores de pH del suelo. Sin embargo, las cantidades de fósforo extraídas por Olsen son muy inferiores a las obtenidas por Bray y Kurtz tornando dificultosa la comparación de resultados (Zalba et al., 2002).

El método conocido como Bray I usa una solución extractora que es una mezcla de  $\text{NH}_4\text{F}$  0,03N y  $\text{HCl}$  0,025N, y se basó en el efecto solubilizador del  $\text{H}^+$  sobre el P del suelo y la capacidad del ión  $\text{F}^-$  de bajar la actividad del  $\text{Al}^{3+}$ , evitando la readsorción de los fosfatos en el sistema de extracción. Este método es recomendado para suelos ácidos debido a que el fluoruro precipita al aluminio y hace al P más soluble (Bray y Kurtz, 1945; Kuo, 1996).

La solución extractora Mehlich III contiene 0,2 M  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , 0,25 M  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 0,015 M  $\text{NH}_4\text{F}$ , 0,013 M  $\text{HNO}_3$  y 0,001 M EDTA a un pH de 2,5. Este método ofrece la ventaja de poder extraer simultáneamente del suelo P, Ca, Na, K, Mg y micronutrientes como Cu, Zn y Mn. Puede ser usado para un amplio rango de pH, desde suelos ácidos a suelos de origen calcáreo. Se ha demostrado que las cantidades de P extraídas con este método correlacionan bien con la disponibilidad de varios de estos elementos para las plantas (Wang et al., 2004).

En la literatura internacional existen diversos trabajos que relacionan las diferentes soluciones extractoras con el P absorbido por la planta: Ramírez et al. (1989), calibraron cuatro métodos de extracción de fósforo del suelo: Olsen ( $\text{NaHCO}_3$ ), Bray I ( $\text{HCl-NH}_4\text{F}$ ), Mehlich 1 ( $\text{HCl-H}_2\text{SO}_4$ ) y Morgan ( $\text{NaOac}$ ) con respecto al rendimiento de maní en experimentos de campo, en suelos con pH entre 4,3 y 8,2 (sólo 3 de 44 suelos no fueron ácidos), encontrando que al relacionar el rendimiento relativo con el fósforo en el suelo, el método de análisis que presentó una mejor correlación fue Bray I (0,76). Sin embargo, una eficacia muy parecida para predecir la respuesta del maní a la aplicación de fósforo al suelo podría obtenerse con los métodos de Olsen y Mehlich 1, debido a que los valores del

coeficiente de correlación de estos fueron 0,73 y 0,74. Los tres métodos funcionaron con igual eficiencia en esos suelos.

Ramírez et al. (1990), calibraron los métodos de análisis del P Morgan, Bray 1, Mehlich 1 y Olsen, en suelos con pH por encima de 6,6 (sólo 3 de 15 suelos fueron menor a 7); para predecir la respuesta del melón a la fertilización fosfatada. Al relacionar el rendimiento relativo con el P en el suelo, se encontró que el coeficiente de correlación más alto fue 0,71 y correspondió al método de Olsen, seguido por Mehlich 1 con 0,63 y finalmente, Morgan y Bray 1 con 0,55. Ramírez y Morales (1989) trabajando con tomate, y González, et al. (1974) concluyeron que era preferible el método Olsen para la determinación de P en suelos de pH por encima de 7.

Ramírez et al. (1987 y 1988) y Ramírez (1989), evaluaron el P disponible del suelo por diversos métodos, en varios suelos, con valores de pH por debajo de 7, y encontraron que el método Bray I fue el que mejor se comportó para predecir el requerimiento de P para sorgo, maíz y yuca.

Sotomayor et al. (2004), realizaron un experimento en cinco suelos de áreas tropicales y subtropicales de Puerto rico y Florida, para evaluar las relaciones entre tres métodos de extracción de P: Olsen, Bray I y Mehlich III y también desarrollaron relaciones cuantitativas con el P disuelto en agua (extraído con  $\text{CaCl}_2$  0,01 M), encontrando que en general el pH y la mineralogía tienen influencia sobre la cantidad de P extraído por los diferentes métodos. En cuatro suelos, la mejor correlación se obtuvo entre Mehlich III y Bray I ( $R^2$ : 0,85).

Abdu (2006), comparó los extractantes químicos convencionales de Bray I, Olsen, Mehlich III con el método disipador de iones que consiste en una membrana de resina y el de tiras impregnadas con FeO, la investigación demostró la eficacia del método disipador de ion con respecto a los métodos convencionales, el autor señaló que el método extrae el P disponible del suelo en forma similar como lo harían las raíces de las plantas.

Fernández y Mendoza (2008), compararon los métodos de extracción Bray I y Olsen, con el método de la tira de papel de filtro embebida en óxido de hierro (Strip), en distintas condiciones de manejo y en órdenes de suelos Entisol, Alfisol y Vertisol, sembrados con cítricos, arroz y pasturas, respectivamente. Los resultados obtenidos sugieren que los tres métodos Olsen, Bray I y Strip describieron de manera adecuada y significativa las relaciones de la MS, % P y P absorbido con el P extraído del suelo. El método Strip fue el más estable y consistente cuando se evaluaron distintas variables vegetales, debido a que su mecanismo de extracción de P del suelo simula de mejor manera el P absorbido por el vegetal. Además encontraron que en los suelos arenosos con bajas capacidades de adsorción o retención de P por el suelo y también baja fertilidad, Olsen y Bray podrían sobreestimar el P disponible, en cambio los suelos vertisoles arcillosos, con buena fertilidad fosforada, Olsen y Bray son afectados por el manejo, y extraen P del suelo de manera diferencial y podrían subestimar el P disponible.

#### **1.1.6 Fósforo en la planta de arroz**

Los suelos inundados ofrecen un ambiente único para el crecimiento y nutrición del arroz, la zona que rodea al sistema radical se caracteriza por la falta de oxígeno. Para evitar la asfixia radicular, la planta de arroz posee espacios de aire bien desarrollados en la lámina de la hoja, en la vaina, en el tallo y en las raíces, que forman un sistema muy eficiente para el traslado del aire del follaje a las raíces, donde es utilizado en la respiración. Finalmente, el aire que sale de las raíces y se difunde en el suelo que las rodea, da origen a una interfase de oxidación-reducción (Dobermann y Fairhurst, 2000).

La planta de arroz es capaz de utilizar diferentes fuentes de P en condiciones de inundación acidificando la rizósfera. Para esto las raíces liberan  $H^+$  para balancear la carga interna que se desequilibra por la mayor absorción de cationes que aniones. También, la generación de  $H^+$  ayuda al proceso de acidificación de la rizosfera por la oxidación (Dobermann y Fairhurst, 2000).



El P es particularmente importante en las primeras fases de crecimiento de la planta. Se requiere aplicar fertilizantes fosfatados cuando el sistema radical de la planta de arroz no está todavía completamente desarrollado y el suplemento de P nativo del suelo es bajo (Dobermann y Fairhurst, 2000).

La fertilización fosfatada en el arroz es fundamental para el crecimiento de la planta, buen ahijamiento, desarrollo de las raíces, adecuadas estructuras florales y oportuna maduración y calidad del grano (Rivillo, 2006). La absorción del fósforo es lenta antes de la etapa de iniciación de la panícula y luego se acelera hasta pasada la floración. Durante la fase vegetativa y hasta la floración, el fósforo se acumula en las raíces y hojas. Posteriormente se traslada rápidamente al grano, donde se concentra 75 % del fósforo absorbido por la planta (Páez, 2004).

Las necesidades de fósforo para producir una tonelada de arroz paddy por hectárea están alrededor de los 5 kg., esta cantidad la planta la absorbe principalmente del suelo y del sobrenadante (Rivillo, 2006).

En Venezuela las fuentes de fertilizante fosforado son las fórmulas completas y el fosfato diamónico (Rivillo, 2006). La aplicación del fósforo es generalmente temprana como cobertura basal, regularmente en una sola dosis inicial. El fraccionamiento del elemento no es fundamental, debido a su la movilidad desde las hojas viejas hacia las nuevas. Asimismo, su disponibilidad aumenta con la inundación del suelo y la pérdidas por lixiviación son bajas (Páez, 2004). La técnica de batido que se emplea en la preparación del suelo podría generar pérdidas de P.

## **1.2 Impacto de la fertilización fosfatada continúa sobre el cadmio en el suelo**

En los últimos años, se ha incrementado el uso de roca fosfórica como fuente de P y de otros fertilizantes fosfatados, lo cual ha generado la acumulación de metales trazas en el

suelo provocando deterioro ambiental, y dependiendo de las características físicas, químicas y biológicas del suelo, el metal puede ser fijado en el suelo o estar disponible para su absorción por la planta (Rothbaum et al., 1986, Smolders et al., 1999, Cardozo et al. 2008).

Herrera (2000), realizó una revisión sobre el origen del cadmio en el suelo y los factores que influyen en su absorción por la planta, encontrando que en el suelo es donde se inicia la incorporación del elemento a la cadena trófica y donde es más factible evitar su acumulación en los alimentos y los posteriores efectos en la salud humana. Se hizo referencia, a que los niveles de cadmio en algunos suelos agrícolas tienden a aumentar como consecuencia de la continua fertilización fosfatada. Además, indicó que el problema no es sólo de suelos contaminados, porque en suelos con un nivel de cadmio que podría considerarse dentro de límites normales, algunas plantas pueden concentrar el elemento y llegar a tener niveles mucho mayores que las del suelo.

Rothbaum et al., (1986), encontraron que la aplicación de fosfatos en suelos de Inglaterra y Nueva Zelanda por largos períodos de tiempo puede producir acumulación del cadmio en estos suelos, estos autores determinaron que en suelos arables de Inglaterra, se aplicó superfosfato en una dosis equivalente a 33 kg de P y 5 g Cd en  $\text{ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$  por 95 años y en suelos arables de Nueva Zelanda, la aplicación fue equivalente a 37 kg de P y 20 g de Cd  $\text{ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$  por 30 años. El Cd acumulado en el horizonte superficial (0-22,5 cm.) fue muy pequeño en los suelos arables de Inglaterra; alrededor de un cuarto del Cd aplicado fue detectado en el subsuelo (22,5-45,0). Cerca de la mitad del Cd aplicado fue retenido en el horizonte 0-22,5 cm de los suelos de pradera en Inglaterra y Nueva Zelanda. La absorción de Cd por plantaciones de trébol en Nueva Zelanda promedió 2% del aplicado.

Maracara y Niño (2004) evaluaron la concentración de metales pesados en rocas fosfóricas nacionales (Riecito, Lizardo alumínica, Lizardo calcítica, Chiguará, Lobatera, Navay y Monte Fresco) e importadas (Marruecos, Togo y Carolina del Norte), además de productos derivados en la agroindustria (tres fertilizantes nacionales y dos fertilizantes importados),

obteniendo en las rocas fosfóricas la presencia de cadmio, plomo y níquel en el 100% de las muestras analizadas, con concentraciones variables, sobrepasando en algunos casos los niveles máximos permitidos. Las concentraciones promedio de cadmio en las rocas fosfóricas nacionales, reportadas por Maracara y Niño (2004) son: Riecito:  $7,67 \text{ mg.kg}^{-1}$ , Lizardo alumínica:  $7,00 \text{ mg.kg}^{-1}$ , Lizardo calcítica: por debajo del límite de detección, Chiguará:  $23,17 \text{ mg.kg}^{-1}$ , Lobatera:  $25,67 \text{ mg.kg}^{-1}$ , Navay:  $14,17 \text{ mg.kg}^{-1}$  y Monte Fresco:  $26,33 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Las concentraciones promedio de cadmio en las rocas fosfóricas internacionales son: Marruecos:  $73,67 \text{ mg.kg}^{-1}$ , Togo:  $91,33 \text{ mg.kg}^{-1}$  y Carolina del Norte:  $80,67 \text{ mg.kg}^{-1}$ .

Las rocas venezolanas presentaron niveles inferiores de cadmio comparados con los valores obtenidos con las rocas importadas. Siendo Riecito y Lizardo Alumínica, aquellos yacimientos con menor contenido de cadmio. Cabe destacar que las reservas del yacimiento Riecito han disminuido a tal punto que se iniciará la explotación de los yacimientos de Monte Fresco y Navay, las cuales presentan contenidos superiores de cadmio que los encontrados en la roca de Riecito ( Maracara y Niño, 2004).

En cuanto a los fertilizantes analizados por Maracara y Niño (2004), ellos encontraron que los nacionales (Roca acidulada (0-33-0), fertilizante (0-28-21) y fosfato especial (16-42-0)), presentaron concentraciones inferiores de metales pesados, cadmio níquel y plomo, con respecto al fosfato diamónico proveniente de Estados Unidos y al fosfato proveniente de Colombia, llegando incluso estos últimos, casi a duplicar los valores de los fertilizantes nacionales. Las concentraciones promedio de cadmio en fertilizantes nacionales son: Roca acidulada (0-33-0):  $6,83 \text{ mg.kg}^{-1}$ , fertilizante (0-28-21):  $8,17 \text{ mg.kg}^{-1}$  y fosfato especial (16-42-0):  $7,33 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Las concentraciones promedio de Cd en el fosfato diamónico proveniente de Estados Unidos fue:  $11,0 \text{ mg.kg}^{-1}$  y el fosfato proveniente de Colombia fue:  $15,83 \text{ mg.kg}^{-1}$ .

Salviano et al., (2006), determinaron la concentración de Cd y Pb en diferentes tipos de fertilizantes fosfatados y además, evaluaron el efecto de éstos sobre la disponibilidad de

Cd y Pb en un suelo cultivado, encontrando que la fuente con menor cantidad de Cd impactó significativamente sobre la concentración de Cd en las raíces, lo que sugiere que la forma química en la que se encuentra el Cd en el fertilizante fue probablemente decisiva en la solubilidad del Cd y su absorción por la planta.

Bonomelli et al. (2003) estudiaron el efecto de la fertilización fosfatada sobre el contenido de Cd disponible en cuatro suelos de Chile: inceptisol, andisol, alfisol, ultisol. Estos investigadores trabajaron con dos tratamientos: sin fertilizar y fertilizando con Súper Fosfato Triple (con  $53,2 \text{ mg.kg}^{-1}$  Cd) hasta alcanzar  $30 \text{ mg.kg}^{-1}$  de P medido por el método de Olsen. Los suelos se incubaron por 90 días a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  a capacidad de campo. El Cd disponible se midió a los 1, 2, 7, 14, 21, 36, 49, 66, 77 y 90 días. Los resultados mostraron que en todos los suelos la cantidad de Cd disponible fue mayor en los tratamientos fertilizados con P en relación a los testigos sin aplicación de fertilizante. En las incubaciones con fosfato, no se encontró efecto estadísticamente significativo del tiempo, es decir, se encontró Cd disponible desde el primer día de la fertilización hasta el último día de medición. De igual forma no se observó interacción significativa entre la dosis y el tiempo de incubación sobre la concentración de Cd disponible en ninguno de los suelos.

A pesar de que muchas investigaciones asocian el contenido de Cd en el suelo y en los cultivos con la aplicación de fertilizantes fosfatados, en Venezuela, se tiene poca información del contenido de Cd en suelos agrícolas que han sido fertilizados continuamente con fosfatos.

### **1.3. El Cadmio**

#### **1.3.1. Propiedades**

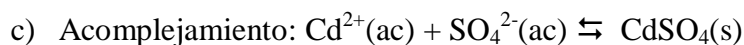
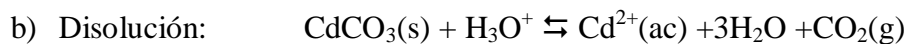
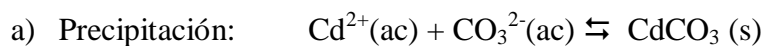
El cadmio (Cd) es un elemento metálico de número atómico 48, masa atómica 112.10 u.m.a, densidad  $8,642 \text{ g.cm}^{-3}$ , símbolo químico Cd, perteneciente al grupo IIB de la tabla periódica. Es de color blanco, blando, dúctil y maleable, y poco abundante en la naturaleza, pero se conoce desde hace mucho tiempo. Sus minerales son escasos, pero como resultado

de su similaridad química con el zinc, se adsorbe fácilmente en los sitios de intercambio del suelo, por sustitución isomórfica en casi todos los minerales del zinc (Cotton y Wilkinson, 2001). Uno de los principales minerales en los que se encuentra el cadmio es la greenokite (CdS), la cual es obtenida como producto secundario en los yacimientos de zinc (Lenntech, 2010)

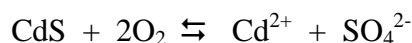
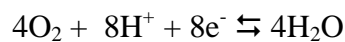
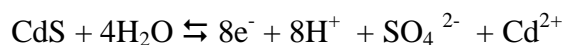
### 1.3.2. Cadmio en el suelo

El cadmio en el suelo se encuentra como  $\text{Cd}^{2+}$ , pero además puede formar varios iones complejos: ( $\text{CdCl}^+$ ,  $\text{CdOH}^+$ ,  $\text{CdHCO}_3^+$ ,  $\text{CdCl}_3^-$ ,  $\text{CdCl}_4^{2-}$ ,  $\text{Cd}(\text{OH})_3^-$  y  $\text{Cd}(\text{OH})_4^{2-}$ ) y quelatos orgánicos. Entre los principales factores que controlan la disponibilidad del cadmio en el suelo se encuentran el pH, el contenido de materia orgánica, el potencial de oxidación, además de otros factores físicos y químicos (Kabata-Pendias y Pendias 1984).

La química del cadmio en el suelo está limitada a complejos y minerales de  $\text{Cd}^{2+}$ . Entre las reacciones principales del cadmio en el suelo se encuentran:



d) Óxido-reducción:



El interés del presente estudio está relacionado con las reacciones del cadmio en sistemas acuosos en presencia de fertilizantes fosfatados, por lo que las posibles reacciones en este

sistema se muestran en la tabla 2.1. Ninguna de las especies de las hidrólisis contribuye significativamente al cadmio en solución excepto, posiblemente el  $\text{CdOH}^+$  y el  $\text{Cd}(\text{OH})_2$  a pH por debajo de 7,5 (Willard et al., 1978).

Cuadro 1.1 Constantes de equilibrio de complejos de Cd (Fuente: Willard et al., 1978)

Reacción N°	Reacción de Equilibrio	Log K°
1	$\text{Cd}^{2+} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Cd OH}^+ + \text{H}^+$	-10,10
2	$\text{Cd}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Cd}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+$	-20,30
3	$\text{Cd}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Cd}(\text{OH})_3^- + 3\text{H}^+$	-33,01
4	$\text{Cd}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Cd}(\text{OH})_4^{2-} + 4\text{H}^+$	-47,29
5	$\text{Cd}^{2+} + 5\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Cd}(\text{OH})_5^{3-} + 5\text{H}^+$	-61,93
6	$\text{Cd}^{2+} + 6\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Cd}(\text{OH})_6^{4-} + 6\text{H}^+$	-76,81
7	$2\text{Cd}^{2+} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Cd}_2\text{OH}^{3+} + \text{H}^+$	-6,40
8	$4\text{Cd}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Cd}_4(\text{OH})_4^{4+} + 4\text{H}^+$	-27,92
9	$\text{Cd}^{2+} + \text{H}_2\text{PO}_4^- \rightleftharpoons \text{Cd HPO}_4 + \text{H}^+$	-4,00

La disponibilidad de los metales pesados en el suelo depende de su concentración en la solución del suelo y de su capacidad para liberar estos iones desde la fase sólida a la solución, de donde son tomadas por la planta (Krishnamurti et al. 1999). Otro de los factores que afectan la disponibilidad del Cd, en el suelo, está asociada a la composición de la fase sólida. El Cd se encuentra unido muy fuertemente a los minerales de arcilla, óxidos de hierro y aluminio y materia orgánica.

La aplicación continúa de fertilizantes fosfatados inorgánicos o de fuentes orgánicas, como lodos de aguas residuales y estiércol, puede ocasionar la acumulación de metales trazas en el suelo, siendo el Cd uno de ellos, el cual posee formas solubles en los fertilizantes y puede ser absorbido por los cultivos (Singh, 1994; Grant, 2011). Algunos investigadores

han estimado que el incremento del contenido de cadmio en suelos y su absorción por las plantas es ocasionado por la aplicación continua de fertilizantes fosfatados (Dunbar et al. 2003; Monteiro et al. 2006; Kuo et al. 2007). En estos estudios destacan la textura y el pH del suelo, como algunos de los factores que inciden en la disponibilidad de este metal (Herrera, 2000; McBride, 1991; MacLaughlin et al. 1997).

El ingreso del Cd en el suelo aumenta con la tasa de aplicación de P, las concentraciones de Cd en fertilizantes y la frecuencia de aplicación son factores importantes que afectan la disponibilidad de Cd; la cual, se ve afectada por los efectos inducidos por el fertilizante y propiedades del suelo, tales como el pH, contenido de materia orgánica, fuerza iónica de la solución del suelo, disponibilidad de Zn, la química de la rizósfera y las asociaciones de micorrizas (Grant, 2011).

He y Singh (1994) evaluaron el efecto de la aplicación de 5 fuentes distintas de fertilizantes fosfatados, sobre el contenido de Cd en avena, centeno, zanahoria y espinaca, cultivados en dos suelos de textura contrastante, encontrando que la aplicación del fertilizante NPK con Cd incremento la concentración de Cd en todas las especies de planta. La concentración de Cd en las plantas fue mayor en el suelo franco que en el arenoso y en diferentes especies de plantas cultivadas en el mismo suelo la concentración de Cd varió en el orden: espinaca > zanahoria > centeno > avena. Las partes vegetativas de todas las plantas acumularon mayor concentración de Cd que las semillas o raíces.

Zubillaga y Lavado (2002) determinaron que la aplicación continua de fosfato diamónico por 20 años en un suelo típico de la Pampa Ondulada (Argentina), cultivado con maíz no incrementó el contenido de Cd total ni biodisponible en el suelo; por lo cual se infirió que la aplicación continua del fertilizante no generará niveles potencialmente tóxicos de Cd en el corto y mediano plazo. Contrario a esta información, Monteiro et al. (2006), encontraron que la aplicación de fertilizantes fosfatados, mediante 4 fuentes distintas (superfosfato triple, termofosfato Yorin, roca fosfórica Araxa y roca fosfórica Gafsa) en un suelo arcilloso (Ultisol) de Brasil, originó un incremento significativo de Cd en el suelo y mayor

absorción por el frijol verde. Todas las fuentes de fósforo incrementaron la absorción de Cd en la primera cosecha y en la segunda sólo se detectó Cd en los brotes de frijol fertilizados con superfosfato triple y con la roca fosfórica de Gafsa, los cuales presentaron mayor contenido de Cd. También, Mann et al. (2002) evaluaron el impacto de las fertilizaciones fosfatadas en suelos bajo cultivo, encontrando que el contenido de Cd fue mayor en los suelos fertilizados que en los suelos no fertilizados.

Cardozo et al. (2008), evaluó la biodisponibilidad de Cd en seis fertilizantes fosfatados (dos fosfatos naturales, dos superfosfato simple, un superfosfato triple y un fosfato monoamónico), utilizando avena *strigosa* como un indicador, el Cd fue biodisponible en los fertilizantes fosfatados, ya que fue encontrado en las raíces y en los brotes de la avena. Los fertilizantes fosforados con altos niveles de Cd incrementaron la acumulación en plantas.

La Acumulación de Cd en el suelo a largo plazo puede reducirse con el uso de fertilizantes con bajas concentraciones de Cd, y por la adopción de prácticas de manejo que optimicen la eficiencia de uso del fertilizante (Grant, 2011).

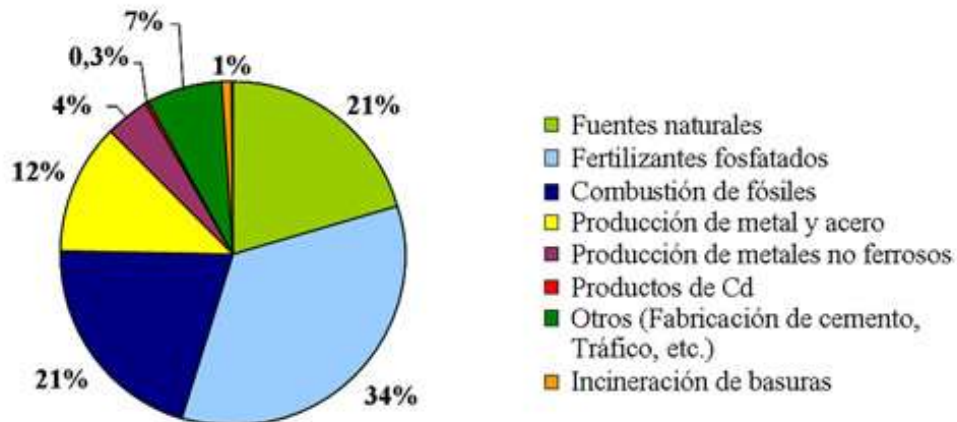
### **1.3.3. Origen de la contaminación por cadmio en el suelo**

La actividad humana libera 3-10 veces más Cd al ambiente que los procesos naturales. En los últimos años, la contaminación por este metal ha aumentado a causa de actividades industriales tales como minería, fundición de metales, uso y purificación de Cd, quema de combustibles fósiles, uso de fertilizantes fosfatados, fabricación de baterías, cemento, pigmentos y plásticos (Palus et al., 2003; Weisberg et al., 2003).

En la figura 1.4 se muestran los factores antropogénicos de contaminación de cadmio en el suelo. Los fertilizantes fosfatados (34%) son la principal fuente de contribución a la polución, seguido por las fuentes naturales (21%) y por la combustión de fósiles (21%), esta información ayuda a visualizar el impacto que tiene el uso intensivo de fertilizantes en



los cultivos y el empleo de combustibles fósiles, sobre la contaminación del sistema suelo, con metales pesados.



**Figura 1.4** Contribución relativa de las diferentes fuentes de Cd al suelo.

Fuente: Rodríguez et al., 2008.

#### 1.3.4. Factores del suelo que afectan la acumulación del cadmio y su disponibilidad

Diversos factores del suelo influyen en la adsorción del metal, entre ellos la presencia de materia orgánica, óxidos de hierro, pH, fuerza iónica de la solución del suelo, los ligandos orgánicos e inorgánicos y el efecto de competencia de otros iones por los lugares de adsorción.

García-Miragaya y Page (1978), señalaron que por encima de pH 6, la adsorción del cadmio se incrementa rápidamente, sin embargo, esto dependerá de las características de los constituyentes del suelo. Pierangeli et al., (2005), estudió el efecto del pH sobre la adsorción y desorción de Cd en 17 suelos (Oxisoles) de Brasil, con diferencias en atributos físicos, químicos y mineralógicos. Los suelos fueron ajustados a pH 4,5; 5,5 y 6,5 y se

incubaron con solución de  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$  por 72 horas. El Cd adsorbido fue: 27 % a pH 4,5; 35 % a pH 5,5 y 55% a pH 6,5. El efecto de los atributos del suelo fue evidenciado cuando se usaron pH 5,5 y 6,5; la correlación significativa se encontró entre el Cd (ads) y MO, el área superficial específica, CIC, kaolinita, hematita, óxidos de Fe y contenido de arcilla. La desorción fue de 20 % a pH 4,5 y 40 % a pH de 5,5 y 6,5.

El efecto del pH sobre la fitodisponibilidad de Cd fue evaluado en un suelo tratado con lodo de albañal (LA), por método isotópico y extracción química. Los tratamientos siguieron un modelo factorial 3 x 5 constituido por tres valores de pH: 4,0; 4,9 y 5,8 con cinco dosis de lodo, el suelo se incubó por 30 días y luego se sembró maíz por 40 días. El uso del trazador isotópico  $^{109}\text{Cd}$  permitió conocer origen del Cd absorbido por las plantas. El valor  $L$  y la solución extractora de DTPA se utilizaron para medir la fitodisponibilidad de Cd en suelo. La aplicación de dosis crecientes de LA provocaron alteraciones químicas y fisicoquímicas en las muestras de suelo, que influenciaron la fitodisponibilidad y disponibilidad del Cd. La absorción de Cd por las plantas aumentó con las dosis crecientes de lodo y con la disminución del pH en el suelo (Álvarez et al, 2008).

La mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, excepto el As, Mo, Se y Cr, los cuales tienden estar más disponibles a pH alcalinos. Este es un parámetro importante para definir la movilidad del catión, debido a que a pH moderadamente altos se produce la precipitación como hidróxidos y a pH muy altos, pueden nuevamente pasar como hidroxicomplejos (García y Dorronsoro, 2004). En la figura 1.5 se muestra la distribución de las especies acuosas de cadmio de acuerdo al pH del suelo.

La textura del suelo es muy importante, para la acumulación y fijación de metales pesados; ya que en suelos arcillosos las arcillas tienden a adsorberlos y quedan retenidos en el complejo de cambio. Por el contrario, los suelos arenosos carecen de capacidad de fijación de los metales pesados, los cuales pasan rápidamente al subsuelo y pueden contaminar las aguas freáticas (García y Dorronsoro, 2004).

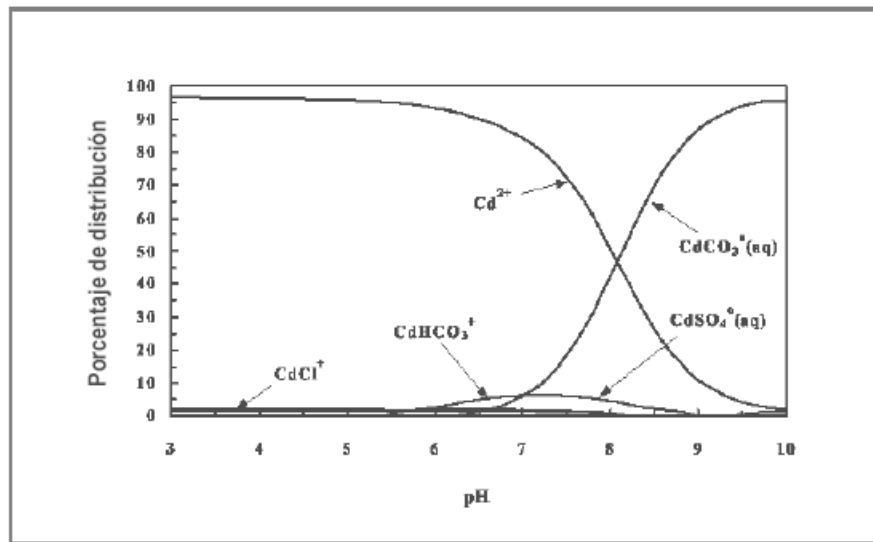


Figura 1.5. Distribución de las especies acuáticas de Cd según el pH del suelo. Fuente: EPA-U.S., 1999.

La influencia de las propiedades del suelo en la fijación y movilidad de Zn y Cd fue evaluada por Estévez et al. (1998). El estudio se realizó en cilindros de PVC, con tres tratamientos T1 ( $50 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ Cd}$ ), T2 ( $100 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ Zn}$ ) y T3 ( $50 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ Cd}$  y  $100 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ Zn}$ ). Los resultados indicaron que el suelo con mayor contenido de materia orgánica, textura más fina, mayor capacidad de intercambio catiónico efectiva y menor porcentaje de saturación de aluminio, fue el que fijó con mayor intensidad Cd y Zn, pero la movilidad del Cd fue mayor que la del Zn en cualquiera de los suelos estudiados. Además, la presencia de Zn favoreció la movilidad y disponibilidad de Cd.

En suelos dedicados al cultivo de la papa, en tres localidades diferentes se encontró que la mayor concentración de cadmio total e intercambiable estaba en el horizonte superficial, lo cual indica la baja movilidad del elemento en el perfil (Insuasty et al. 2008).

La materia orgánica, reacciona con los metales adsorbiéndolos o formando complejos, los cuales, pueden emigrar con mayor facilidad en el perfil del suelo. La complejación por la materia orgánica es uno de los procesos que gobierna la solubilidad y la bioasimilación de los metales pesados y su toxicidad se potencia en gran medida por 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 (García y Dorronsoro, 2004).

Cuando la capacidad de intercambio catiónico y contenido de materia orgánica aumenta se incrementa el número de grupo funcionales responsables de la adsorción del Cd. Por consiguiente, cuanto mayor sea la capacidad de intercambio catiónico mayor será la capacidad del suelo de fijar metales. El poder de adsorción de distintos metales pesados depende de su valencia y del radio iónico hidratado; a mayor tamaño y menor valencia, la retención es menor (García y Dorronsoro, 2004).

Sánchez et al. (2011), determinaron la capacidad de adsorción de cadmio, de cuatro suelos venezolanos de uso agrícola con diferencias texturales, encontrando que el grado de adsorción de Cd en estos suelos, no sólo se relacionó con las diferencias texturales, sino también con la CICE, contenido de calcio, contenido de MO y pH ácido.

Scheidegger et al., (1996), utilizaron conceptos de la química de coordinación para caracterizar la adsorción en base a la formación de complejos de esfera externa y de esfera interna (Figura 1.6). En los primeros, la energía que mantiene retenido al cadmio a la superficie es relativamente baja ya que hay un impedimento estérico debido a la presencia de moléculas de agua de hidratación que impide el contacto directo entre el ión adsorbido y la superficie adsorbente. Por otro lado, cuando se forma un complejo de esfera interna, la unión es más fuerte y puede llegar a producirse una adsorción irreversible, lo cual además de disminuir la movilidad del elemento hace que el suelo se comporte como un depósito de material contaminante sin riesgo de que entre a la cadena alimenticia vía absorción por los cultivos.

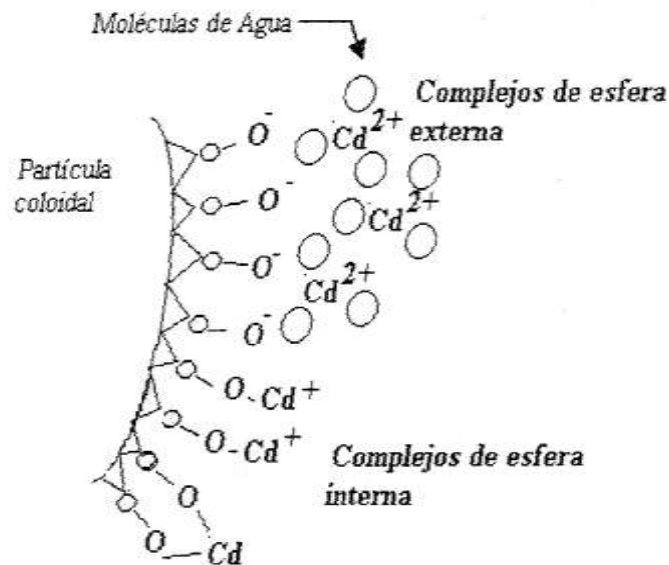


Figura 1.6 Formación de complejos de esfera interna y externa. Fuente: Scheidegger et al., 1996.

Pierangeli et al. (2005), estimaron que el movimiento de elementos trazas en suelos está íntimamente asociado a factores que contribuyen a su retención en fase sólida; dentro de esos factores, se destaca la presencia de aniones adsorbidos. Estos investigadores evaluaron el efecto del pre-tratamiento del suelo con P sobre la absorción o desorción de Cd, Cu y Pb en muestras de horizontes A y B en dos suelos Oxísoles. El pre-tratamiento de P en el suelo consistió en dejar en reposo durante 72 h, con  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$   $10,75 \text{ mmol L}^{-1}$  (relación suelo: solución fue de 1:1,5). Los resultados indicaron que el pre-tratamiento con P aumentó la adsorción de todos los metales, siendo menor en las muestras del horizonte B; lo cual indica que la presencia de P contribuye a reducir la disponibilidad de metales en esos suelos.

### 1.3.5. Cadmio en plantas

Las plantas responden al cadmio activando la síntesis de glutatión, fitoquelatinas y nicotianamina como respuestas específicas a este tipo de contaminantes. De igual modo, hay una gama de respuestas moleculares generales. Estas respuestas biológicas hacen de las plantas excelentes indicadores de contaminación por este metal pesado, pudiendo ser importantes herramientas para el monitoreo ambiental (Pernía et al., 2008).

La acumulación de Cd en diferentes partes de la planta de algodón (*Gossypium hirsutum* cv. IAC 22), fue estudiada aplicando dos dosis de lodos de las plantas de tratamiento que contenían Cd, a un suelo arcilloso; encontraron que los lodos de las aguas residuales contaminados con Cd promovieron la acumulación Cd en raíces y brote (Rodríguez et al., 2007).

La absorción y distribución de Cd en las patatas fue investigado en dos cultivares que diferían en la concentración de Cd en el tubérculo. Las plantas fueron cultivadas en suelos con Cd complementario. Las concentraciones de Cd en los diferentes tejidos variaron en el siguiente orden: raíz > brotes >> tubérculo. Se encontró diferencias entre cultivares, asociadas a la distribución del Cd en la planta y se explica porque el cultivar clasificado como bajo acumulador (Wilwash) presentó retención de Cd 3 veces mayor en las raíces; las cuales actúan como secuestradoras de Cd, generando en ese cultivar menor concentración de Cd en el tubérculo (Dunbar et al., 2003).

Liu et al. (2007), estudiaron la absorción y transporte de cadmio en seis cultivares de arroz, una pequeña porción 0,73% del Cd absorbido por la planta fue trasladado al grano. El Cd en el grano correlacionó significativa y positivamente con el Cd en la planta. No hubo correlaciones significativas entre la absorción total de Cd y la acumulación entre las partes vegetativas de los diferentes cultivares. También se encontró que en el grano de arroz el

Cd no se distribuyó uniformemente en los diferentes productos después del procesamiento, la mayor concentración se encontró en la corteza del grano.

La disponibilidad, acumulación y toxicidad de Cd y Zn fue evaluada en un suelo contaminado con Cd (0, 1, 3, 5, 10 y 20 mg.kg<sup>-1</sup>) y Zn (0, 10, 30, 50, 100, 150 mg.kg<sup>-1</sup>) y cultivado con maíz por 30 días por Vieira da Cunha et al. (2008), ellos encontraron alta correlación entre los extrantantes usados y el contenido de Cd en planta. La adición de los metales redujo la producción de biomasa e incrementó el contenido de Cd y Zn en planta. Los valores de toxicidad por Cd estuvieron entre 8,7 – 13,1 mg.kg<sup>-1</sup>. La clorosis de las hojas, el arrugamiento y encurvamiento fueron los síntomas más comunes en las plantas contaminadas Cd.

El efecto de las concentraciones de Cr, Cd, y Pb sobre genotipos de arroz, fue medido en 138 genotipos y tres suelos contaminados por Zeng et al. (2008). La interacción entre el genotipo y el tipo de suelo fue significativa. Hubo una correlación significativa entre el Cd y Pb en suelos ligeros y altamente contaminados con metales pesados. Los resultados indicaron que hay posibilidades de desarrollar variedades de arroz con bajas concentraciones de Cd y Pb en el grano de arroz.

En Venezuela se han realizado estudios sobre el contenido de Cd en cultivos de cacao en Aragua y Miranda. En Miranda el contenido de Cd en las almendras varió entre 0,5 mg.kg<sup>-1</sup> hasta más de 10 mg.kg<sup>-1</sup> (Izquierdo y Ramírez, 2000); estos valores son superiores a 0,5 mg.kg<sup>-1</sup>, de acuerdo con la norma FAO/OMS (2007). Los niveles de Cd disponible en ese suelo, estaban entre 0,25 y 1,25 mg.kg<sup>-1</sup>; 0,8 mg.kg<sup>-1</sup> es el estándar de calidad de suelos agrícolas según la Guía de Protección Ambiental de la Comunidad Europea (Guía de protección ambiental, 1995). Es importante señalar que el cacao es un cultivo donde poco se emplea fertilizante, motivo por el cual los investigadores atribuyen la presencia de cadmio en el suelo y en las almendras a la génesis de esos suelos. Adams, (1996), encontró que los niveles de cadmio en las almendras de cacao del estado Aragua estaban dentro de los niveles de tolerancia establecidos.

## **CAPÍTULO II**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

Para lograr los objetivos propuestos, la investigación se desarrolló en varias etapas: selección de las parcelas productoras de arroz, muestreo de suelos y de plantas, y análisis químico de suelos.

#### **2.1. Selección de las parcelas.**

Se seleccionaron cuarenta y tres (43) parcelas con características e historias de manejo de fertilización fosfatada diferente, ubicados en el Sistema de Riego del Río Guárico, en los llanos centrales en el año 2007; las cuales se identificaron geográficamente (Anexo 1). Para la selección de las parcelas se usó una encuesta (Anexo 2), la cual indica principalmente: años de cultivos de arroz, el manejo del sistema suelo-planta, dosis aproximada y tipo de fertilizante fosfatado usado, forma de aplicación del fertilizante y variedad de arroz. Se escogieron aquellas parcelas con diferentes años de fertilización fosfatada, que varió entre 5 y 50 años.

#### **2.2. Muestreo de suelos**

El muestreo de suelos se hizo siguiendo el método de zig zag, dentro de cada “tanque” (espacio encerrado por terraplén o pequeños diques, según las curvas de nivel; Arroz, 2003) de aproximadamente 1 hectárea, donde se tomaron 20 muestras a una profundidad de 0-20 cm usando un tubo de muestreo de 7 cm de diámetro. Las 20 muestras se mezclaron para conformar una muestra compuesta por parcela. Los suelos se secaron al aire, se trituraron, se tamizaron a través de una malla de 2 mm y luego se almacenaron para su posterior análisis.



### **2.3. Muestreo de plantas**

En cada punto de muestreo de suelo se tomó una macolla de arroz, para tener 20 macollas por parcela. El muestreo se realizó en la etapa de madurez fisiológica, próximo a cosecha. Las plantas se lavaron con agua desmineralizada y se secaron a 70 °C por 48 horas en una estufa de ventilación forzada. Se dividieron en grano, cascarilla y rastrojo y se pesaron para determinar la materia seca (MS). El material vegetal se molió, se tamizó usando una malla de 1 mm y luego se guardó para su posterior análisis químico.

### **2.4. Análisis químico de los suelos**

En cada muestra de suelo se determinó la textura por el método de Bouyoucos (Bouyoucos, 1962), el contenido de materia orgánica (MO) por oxidación con dicromato (Heanes, 1984), el pH en una relación suelo:agua 1:2,5; luego de agitar por una hora, el aluminio intercambiable se determinó con una solución de KCl 1 N y absorción atómica (Barnhisel y Bertsch, 1982), la determinación de la CIC y calcio se realizó por el método de Rhoades, (1982) y por la técnica de absorción atómica, el cadmio y zinc intercambiable se extrajeron con DTPA con una relación suelo:extractante de 1:2 (Baker y Amacher., 1982) y mediante la técnica de ICP. El fósforo disponible se determinó por los métodos de Bray 1, (Bray y Kurtz, 1945) Olsen (Olsen et al., 1954), Mehlich III (Mehlich, 1984). El P soluble en agua se determinó mediante el método de Fuhrman et al., (2005), el cual se modificó basado en análisis preliminar, utilizando la relación suelo:agua deionizada de 1:2,5 con un tiempo de agitación de 10 minutos, en el extracto se determinó P por el método colorimétrico de Murphy y Riley (1962). Todos los análisis se realizaron por triplicado.

### **2.5. Fraccionamiento de P del suelo**

El fraccionamiento de fósforo en los suelos se hizo por triplicado siguiendo el método desarrollado por Tiessen y Moir, (1993) y ajustado por Hernández y López (1997). En el cuadro 2.1 se indican las fracciones separadas y el procedimiento se detalla a continuación:

Se pesaron 2 g de suelo en tubos de centrifuga de 50 mL, se agregó 20 mL de agua destilada y se colocaron dos tiras con resina de intercambio aniónico, se agitó por 16 h, luego se removieron las tiras con resinas, se colocaron en un tubo de centrifuga de 50 mL, a éstas se agregó 20 mL de HCl 0,5 M, se agitó por 16 h y se determinó el P (Murphy Riley, 1962), el cual corresponde al P disponible y soluble (PiR).

La suspensión suelo: agua restante se centrifugó a 2500 rpm por 10 min., se decantó y se descartó el sobrenadante; el suelo se secó a 80 °C. Al suelo seco se le agregó 20 mL de NaHCO<sub>3</sub> 0,5 M (a pH 8,5) y se agitó por 16 horas. La suspensión se centrifugó a 2500 rpm por 10 min. a temperatura ambiente, se decantó y el sobrenadante se dividió en dos porciones: en una se determinó P inorgánico lábil (PiL), (el extracto presentó coloración, se precipito la materia orgánica con la adición de gotas de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 7,2 N) y en la otra porción del extracto se determinó el P total mediante una digestión húmeda, colocando 3 mL del extracto en balón aforado de 25 mL, se adicionó 6 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 7,2 N y 0,38 g de persulfato de amonio, se tapó con papel aluminio y se colocó en una autoclave a 150 kPa por una hora. En esta última porción del extracto se determinó el P total por colorimetría, y por diferencia con el P inorgánico se determinó el P orgánico lábil (PoL).

El suelo restante se lavó con 20 mL de agua destilada, se centrifugó, se decantó y se descartó el sobrenadante, luego se seco como se hizo anteriormente. Al suelo seco se adicionó 20 mL de NaOH 0,1 M y se agitó la suspensión por 16 h, luego se centrifugó a 2500 rpm por 10 min., se decantó y el extracto de NaOH se dividió en dos porciones: en una se determinó P inorgánico moderadamente lábil (PiML), (el extracto presentó una coloración muy oscura, la adición de gotas de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 7,2 N no precipito toda la materia orgánica presente; por lo cual, el extracto se dividió en dos partes, en una se adicionó reactivo A y en la otra reactivo B para desarrollo de color) y en la otra porción del extracto se determinó el P total mediante una digestión húmeda (igual que en la fracción de bicarbonato). En la segunda porción del extracto se determinó el P total por colorimetría, y por diferencia con el P inorgánico se determinó el P orgánico moderadamente lábil (PoML).

El suelo restante se lavó con 20 mL de agua destilada, se centrifugó, se decantó y se descartó el sobrenadante, luego se seco como se hizo anteriormente. Al suelo seco se agregó 20 mL de HCl 1 M, la suspensión se agitó por 16 horas y luego se centrifugó a 2500 rpm por 10 min., se decantó el sobrenadante y se dividió en dos porciones: en una se determinó Pi ligado al calcio ó ligeramente lábil (PiLL) y en la otra porción del extracto se determinó el P total mediante una digestión húmeda (igual que en la fracción de bicarbonato). En la segunda porción del extracto se determinó el P total por colorimetría, y por diferencia con el P inorgánico se determinó el P orgánico ligado al calcio ó ligeramente lábil (PoLL).

El suelo restante se lavó con 20 mL de agua destilada, se centrifugó, se decantó y se descartó el sobrenadante, luego se seco como se hizo anteriormente. El residuo sólido se calentó con 5 mL de HCl concentrado en un baño maría a 80 °C por 10 min., los tubos se sacaron del baño maría y se adicionó otros 5 mL de HCl concentrado y se continuó con el baño maría a 80 °C por 10 min. Los tubos se sacaron del baño maría y se dejaron equilibrar a temperatura ambiente por 1 hora. La suspensión se centrifugó a 2500 rpm por 10 min, se decantó y el sobrenadante se reservó. El suelo restante se lavó con 10 mL de agua destilada, se centrifugó y se adicionó este lavado junto con el sobrenadante de HCl concentrado previamente reservado. El extracto de HCl concentrado se dividió en dos porciones: en una se determinó Pi recalcitrante/ocluido (PiO) y en la otra se determinó el P total mediante una digestión húmeda (igual que en la fracción de bicarbonato). En la segunda porción del extracto se determinó el P total por colorimetría, y por diferencia con el P inorgánico se determinó el P orgánico fijado (PoO).

El suelo se secó a 80 °C y se trasvasó a tubos de digestión usando 10 mL de agua destilada, se agregó 5 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y dos perlas de ebullición y se digirió en un bloque, subiendo la temperatura muy lentamente para evaporar el agua, cuando se alcanzó 360 °C se inició el tratamiento con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> de la siguiente forma: se removieron los tubos del bloque y se dejaron enfriar a la mitad del calor; se adicionó 0,5 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y se calentó a 360 °C por 30 min. Se repitió la adición de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> hasta que el líquido estuvo claro, 5 veces

aproximadamente, (hubo calentamiento después de la adición final del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, para evitar interferencias en la determinación del P). El extracto a temperatura ambiente, se trasvasó y se aforó en un balón de 25 mL, se filtró y se transfirió a viales, luego se determinó P inorgánico recalcitrante/residual/látice (PiRC)

Cuadro 2.1: Fracciones de P extraídas de acuerdo al método de Tiessen y Moir, (1993).

<b>Extractante</b>	<b>Denominación</b>	<b>Fracción determinada</b>
Resina (tiras)	PiR	Fósforo disponible soluble
NaHCO <sub>3</sub> 0,5 M	PiL- PoL	P lábil inorgánico y P orgánico lábil
NaOH 0,1 M	PiML  PoML	P inorgánico moderadamente lábil (ligado al Fe y Al)  P orgánico moderadamente lábil (ligado a los ácidos húmicos)
HCl 1 M	PiLL  PoLL	P ligados al Ca  P inorgánico y P orgánico ligeramente lábil
HCl concentrado	PiO  PoO	P inorgánico recalcitrante/ocluido  P orgánico fijado
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc.  + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	PiRC	P recalcitrante/residual/látice  P inorgánico fijado

## 2.6. Determinación de cadmio y zinc en el suelo

Se pesaron 20 g de suelo seco, se colocaron en un frasco y se adicionó 40 mL de solución extractora con DTPA (ajustada a pH: 7,35), se taparon y se colocaron en un agitador horizontal a una velocidad de 120 ciclos/segundo, por dos horas, luego la suspensión fue filtrada con papel whatman N° 42 (Baker y Amacher, 1982).

En cada extracto obtenido se determinó cadmio y zinc, para lo cual se utilizó el equipo de Plasma Acoplado Inductivamente, VARIAN LIBERTY AX SECUENCIAL ICP-OES.

En la hoja de trabajo del equipo de ICP se seleccionaron las siguientes condiciones de trabajo: Presión del nebulizador: 200 KPa; potencia: 1,20 kW; flujo de plasma: 1,50 L/min; flujo auxiliar 1,50 L/min; tiempo de replicas: 1 s; tiempo de estabilización: 15 s; voltaje PMT 650 V; líneas de emisión seleccionadas: cadmio: 228,802 y zinc: 213,856. Los extractos concentrados son agitados y ordenados como indica da secuencia en la hoja de trabajo para su determinación.

Debido al bajo contenido de cadmio en los extractos se procedió a determinar inicialmente el límite de detección y el límite de cuantificación (Cámara et al. 2004).

**Límite de detección:** mínima cantidad de analito que proporciona una señal significativamente diferente de la señal del blanco.

**Límite de cuantificación:** mínima cantidad de analito capaz de ser determinada por un método analítico con una precisión y exactitud aceptable.

Fórmulas empleadas:

$$LD = \frac{3\sigma_B}{b} \qquad LQ = \frac{10\sigma_B}{b}$$

LD= Concentración para el límite de detección

LQ= Concentración mínima para la cuantificación

$\sigma_B$  = Desviación estándar del blanco

b= Pendiente en la curva de calibración para cada metal

Cuadro 2.2: Valores de los límites de detección y cuantificación obtenidos para los metales analizados

Metal	LD		LQ	
	ppm	ppb	ppm	ppb
Cadmio	$2,48 \times 10^{-4}$	0,25	$8,27 \times 10^{-4}$	0,83
Zinc	$2,56 \times 10^{-4}$	0,26	$8,53 \times 10^{-4}$	0,85

## 2.7. Análisis de Material Vegetal

### 2.7.1. Determinación de fósforo

Se pesó 0,5 g de muestra seca a 70°C y se colocó en un tubo de digestión, se agregó 4 mL ácido nítrico concentrado y se dejó en reposo hasta el otro día, luego se colocó el tubo con la muestra, en el bloque de digestión (con control de temperatura de digital 0- 400 °C) y se calentó a 120 °C por 1 hora, la mezcla se enfrió y se agregó 4 mL de peróxido de hidrógeno al 35% y se calentó en el bloque a 120 °C, el calentamiento se realizó por una hora, se repitió la adición de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> hasta que el líquido estuvo claro, luego se enfrió y se llevó aforo hasta 25 mL con agua destilada (Wolf et al, 1991). Todas las digestiones se realizaron por triplicado.

En cada extracto de fósforo se reveló color mediante reacción con molibdato de amonio-ácido ascórbico y se determinó su concentración mediante colorimetría (Murphy y Riley, 1962).

El porcentaje de P en la planta se determinó como la suma de las fracciones del P en el follaje de la planta, de acuerdo a la ecuación:

$$\%P_{\text{Planta}} = \%P_{\text{grano}} \times \left(\frac{A(g)}{D(g)}\right) + \%P_{\text{cascarilla}} \times \left(\frac{B(g)}{D(g)}\right) + \%P_{\text{rastrajo}} \times \left(\frac{C(g)}{D(g)}\right)$$

Donde A: Masa de grano, B: Masa de la cascarilla, C: Masa del rastrojo y D: Masa total de la planta

### 2.7.2. Determinación de cadmio y zinc

El cadmio y el zinc se determinaron en el extracto del material vegetal que se obtuvo mediante digestión y se utilizó previamente para el análisis de P. El equipo usado fue un Plasma Acoplado Inductivamente, VARIAN LIBERTY AX SECUENCIAL ICP-OES y se trabajó bajo las mismas condiciones experimentales que para la determinación de Cd y Zn en extractos de suelos.

El cadmio en la planta se calculó como la suma de las fracciones del Cd en el grano, cascarilla y rastrojo, expresándose de acuerdo a la ecuación:

$$Cd_{Planta} = Cd_{grano} \times \left( \frac{A(g)}{D(g)} \right) + Cd_{cascarilla} \times \left( \frac{B(g)}{D(g)} \right) + Cd_{rastrajo} \times \left( \frac{C(g)}{D(g)} \right)$$

Donde A: Masa de grano, B: Masa de la cascarilla, C: Masa del rastrojo y D: Masa total de la planta

### 2.8. Análisis estadístico

Las concentraciones de fósforo y cadmio determinadas en suelo y planta de arroz se sometieron a un análisis estadístico de correlación-regresión para establecer las relaciones entre nutrientes y sus efectos sobre la absorción por la planta. Por otra parte, con los valores de P obtenidos mediante el fraccionamiento en suelo, se correlacionaron con el P y Cd absorbidos por la planta, utilizando el programa INFOSTAT.

El Análisis de Varianza Multivariado (MANOVA), se hizo con el programa MINITAB 15, para tratar de asociar un conjunto de factores (pH, materia orgánica y textura), con otro de variables (Pagua, P Olsen, P Bray I, P Mehlich III, PiR, PiL, PoL, PiML, PoML, PiLL, PoLL, PiO, PoO, PiRC), de manera de establecer un modelo funcional que permita predecir el comportamiento de las variables con base a los factores.



## CAPÍTULO III

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Análisis químico de los suelos

Los suelos recolectados en las 43 parcelas se analizaron para conocer el pH, materia orgánica, textura, arcilla, capacidad de intercambio, calcio, zinc y aluminio. Los resultados se muestran en el cuadro 3.1.

Los suelos resultaron ácidos o ligeramente ácidos con valores de pH entre 3,53 y 6,91. El pH óptimo para el cultivo de arroz está comprendido entre 5,2 y 6,5 (Páez, 2004). En la figura 3.1 se observa que sólo 13 suelos están fuera del rango de pH óptimo, la mayoría, 70%, tienen el pH adecuado.

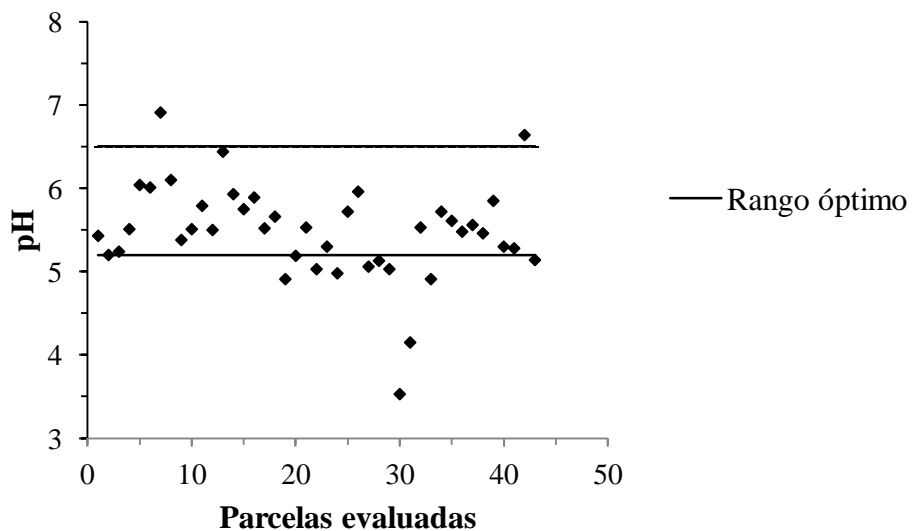


Figura 3.1 Valores de pH de los suelos bajo cultivo de arroz en el Estado Guárico.

Los suelos presentaron texturas correspondientes a suelos francos 16,2 %; arcillosos y arcillo-limosos 37,2 % y franco-arcillosos, franco-limosos, franco arcillo limosos 46,5 %.

El contenido de materia orgánica fue variable entre 1,7% y 4%, con un promedio de 2,77%; el 42 % de los suelos estuvo encima del valor promedio. Fassbender y Bornemisza (1987), encontraron para suelos Vertisoles de América latina, de pH ácidos, valores de 1,75 % de MO. Sotelo et al. (2007), reportaron valores de materia orgánica entre 0,74 y 1,01% en suelos Vertisoles de México.

La capacidad de intercambio catiónico varió entre 0,7 y 14  $\text{cmol.kg}^{-1}$ ; el 79 % de suelos presentó CIC entre 0,7 y 10  $\text{cmol.kg}^{-1}$  y el 44,2 % presentó valores iguales o menores a 4  $\text{cmol.kg}^{-1}$ ; este último valor es considerado como limitante en la fertilidad de los suelos (Sánchez et al., 1982).

El contenido de calcio fue variable entre 49,6  $\text{mg.kg}^{-1}$  y 2811,5  $\text{mg.kg}^{-1}$ , con un valor promedio de 1204  $\text{mg.kg}^{-1}$ . El 93% de los suelos presentaron valores superiores a 400  $\text{mg.kg}^{-1}$ , nivel considerado alto por López et al. (2008). Estos resultados se corresponden con lo reportado por Useche et al. (1976).

El contenido de Zn disponible estuvo comprendido entre 0,42 y 4,01  $\text{mg.kg}^{-1}$ , con un valor promedio de 2,25  $\text{mg.kg}^{-1}$ ; el 44 % de los suelos presentó valores entre 1,5 y 2,5  $\text{mg.kg}^{-1}$ . De acuerdo al criterio de Quiñones (1991) estos suelos se consideraron en un rango normal de Zn. Posteriormente, Arriechi y Ramírez (1997) encontraron como valor crítico de Zn, para los suelos ácidos del país, 2,4  $\text{mg.kg}^{-1}$ . En la figura 3.2 se observa que el 51% de suelos presentaron valores por debajo del nivel crítico.

El contenido de Al intercambiable estuvo comprendido entre 2,90 y 38,90  $\text{mg.kg}^{-1}$ , con un valor promedio de 13,09  $\text{mg.kg}^{-1}$ ; el 88% de suelos presentó valores entre muy bajo (8,9  $\text{mg.kg}^{-1}$ ) y bajo (de 9,8 a 22,2  $\text{mg.kg}^{-1}$ ) contenido de Al (Bernier, 1999). Cuadro 3.1.

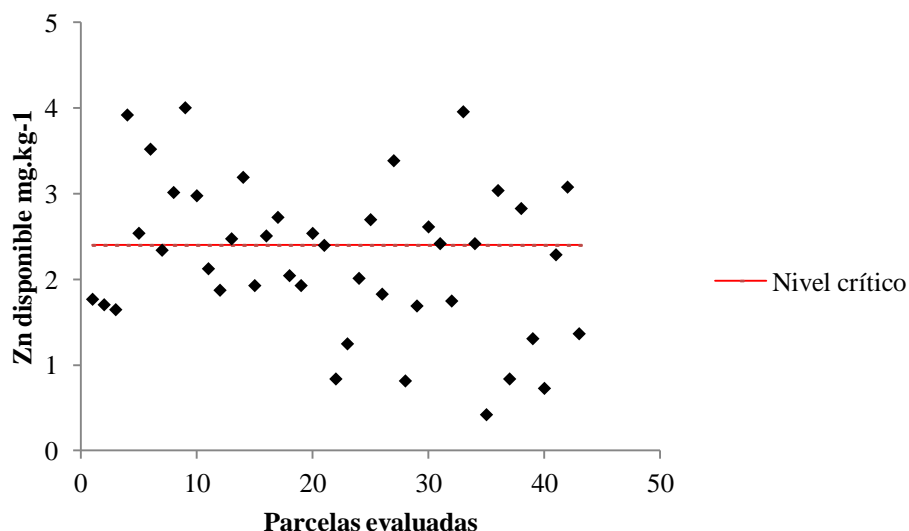


Figura 3.2 Valores de zinc disponible de los suelos bajo cultivo de arroz en el Estado Guárico

Los suelos ácidos seleccionados para el trabajo son en general pesados, con mediano contenido de materia orgánica, altos en calcio, muy bajos en CIC.

Los coeficientes de variación (CV) fueron superiores a 20 %, lo que indica una gran heterogeneidad entre las parcelas; sólo los valores de pH presentaron valores de CV bajos (11%). Los altos valores en los CV para los suelos bajo cultivo de arroz en el Estado Guárico se corresponden con lo reportado por Boschetti et al. (2003) al medir las principales características físicas y químicas en 13 suelos de la Mesopotamia Argentina.

Cuadro 3.1: Resultados promedio de los análisis de los suelos

Muestra	pH (1:2,5)	MO (%)	textura	Arcilla %	CIC cmol.kg <sup>-1</sup>	Cationes en el suelo (mg.kg <sup>-1</sup> )		
						Ca	Zn	Al
sue-01	5,43	2,60	FA	27,20	3,74	688,78	1,77	23,30
sue-02	5,20	1,70	F	13,20	1,88	382,24	1,71	20,60

Muestra	pH (1:2,5)	MO (%)	textura	Arcilla %	CIC cmol.kg <sup>-1</sup>	Cationes en el suelo (mg.kg <sup>-1</sup> )		
						Ca	Zn	Al
sue-03	5,24	2,20	FL	19,20	2,54	532,95	1,65	19,40
sue-04	5,51	3,50	A	49,20	10,66	1923,30	3,92	11,60
sue-05	6,04	2,30	FAL	37,20	5,94	1152,07	2,54	9,90
sue-06	6,01	3,00	FA	35,20	6,61	1140,29	3,52	2,90
sue-07	6,91	2,30	FA	29,20	7,39	1367,70	2,34	12,10
sue-08	6,10	2,70	A	55,20	10,03	1677,64	3,02	8,40
sue-09	5,38	3,50	AL	47,20	6,62	1348,78	4,01	16,30
sue-10	5,51	2,80	AL	41,20	5,33	958,55	2,98	9,40
sue-11	5,79	2,60	FA	31,20	3,91	793,83	2,13	5,00
sue-13	5,50	2,60	FAL	31,20	4,13	841,69	1,88	19,80
sue-14	6,44	2,70	AL	43,20	9,01	1778,16	2,48	3,80
sue-16	5,93	3,20	AL	43,20	7,41	1389,60	3,19	3,10
sue-17	5,75	3,50	AL	41,20	9,43	2018,33	1,93	16,40
sue-18	5,89	2,70	FAL	39,20	7,72	1525,55	2,51	4,20
sue-19	5,52	3,70	A	47,20	8,52	1517,39	2,73	6,70
sue-20	5,66	2,40	FA	29,20	5,40	1117,86	2,05	7,40
sue-21	4,91	2,30	F	19,20	2,38	524,71	1,93	18,40
sue-22	5,19	3,00	A	43,20	4,78	853,59	2,54	18,60
sue-23	5,53	4,00	AL	41,20	12,99	2352,81	2,40	8,60
sue-24	5,03	2,30	FL	9,20	1,56	353,85	0,84	14,30
sue-26	5,30	2,50	F	21,20	4,07	877,82	1,25	18,00
sue-27	4,98	2,40	FL	17,20	2,29	484,69	2,01	26,60
sue-28	5,72	3,60	A	47,20	11,92	2332,97	2,70	3,90
sue-29	5,96	3,00	A	47,20	11,02	2273,59	1,83	4,40
sue-30	5,06	2,70	F	21,20	3,09	626,30	3,39	17,60
sue-31	5,13	2,40	F	19,20	0,66	49,63	0,82	25,70

Muestra	pH (1:2,5)	MO (%)	textura	Arcilla %	CIC cmol.kg <sup>-1</sup>	Cationes en el suelo (mg.kg <sup>-1</sup> )		
						Ca	Zn	Al
sue-33	5,03	2,10	FL	17,20	2,29	518,12	1,69	14,80
sue-34	3,53	2,60	FL	15,20	1,69	385,78	2,62	4,20
sue-35	4,15	2,10	FL	15,20	2,25	473,02	2,42	18,40
sue-36	5,53	2,70	A	47,20	9,56	1913,77	1,75	4,90
sue-37	4,91	3,80	A	53,20	13,03	2811,46	3,96	11,60
sue-38	5,72	3,40	FAL	33,20	10,01	2173,55	2,42	10,10
sue-40	5,61	2,40	FL	25,20	2,50	412,44	0,42	6,40
sue-41	5,48	3,20	A	45,20	13,30	2798,22	3,04	7,30
sue-43	5,56	2,80	F	25,20	3,46	788,36	0,84	38,90
sue-44	5,46	3,20	FAL	37,20	6,74	1355,46	2,83	4,50
sue-45	5,85	2,80	FAL	27,20	5,15	1073,80	1,31	16,90
sue-46	5,30	1,80	FL	15,20	1,97	449,15	0,73	9,40
sue-47	5,28	2,00	FL	17,20	2,81	622,90	2,29	22,50
sue-48	6,64	3,50	A	51,20	14,31	2391,68	3,08	8,60
sue-49	5,14	2,30	F	21,20	3,33	731,81	1,37	27,80
<b>Promedio</b>	<b>5,48</b>	<b>2,77</b>	-	<b>32,36</b>	<b>6,13</b>	<b>1204,28</b>	<b>2,25</b>	<b>13,09</b>
<b>SD</b>	<b>0,58</b>	<b>0,56</b>	-	<b>13,00</b>	<b>3,82</b>	<b>735,86</b>	<b>0,88</b>	<b>8,18</b>
<b>Máximo</b>	<b>6,91</b>	<b>4,00</b>	-	<b>55,20</b>	<b>14,31</b>	<b>2811,43</b>	<b>4,01</b>	<b>38,90</b>
<b>Mínimo</b>	<b>3,53</b>	<b>1,70</b>	-	<b>9,20</b>	<b>0,66</b>	<b>49,63</b>	<b>0,42</b>	<b>2,90</b>
<b>C.V.</b>	<b>11</b>	<b>20</b>	-	<b>40</b>	<b>62</b>	<b>61</b>	<b>39</b>	<b>62</b>

### 3.1.2 Correlaciones entre las distintas variables de suelos

En el cuadro 3.2 se observa que al correlacionar el pH con el Al, Zn, Ca, MO, % arcilla y CIC, no hubo correlación con el Zn ni con el contenido de MO, esto se corresponde con lo mostrado por Arriechi y Ramírez (1997) en suelos ácidos Venezolanos; ellos lo atribuyen a

la poca variación entre los valores de pH y de MO, esta observación que hacen se corresponde con los datos obtenidos en este estudio. Se observó una asociación negativa entre el pH y Al, lo cual se corresponde con lo reportado por Casanova (2005), aunque la correlación fue baja. El pH correlacionó positivamente con el Ca y CIC, se esperaría una correlación negativa; porque al aumentar el pH se forman hidróxidos de calcio poco solubles. El Al correlacionó en forma negativa con todas las variables, al haber mayor contenido de Al menor será el de Ca, Zn, CIC y MO, debido a que el contenido de Al es mayor a pH más ácidos y bajo esas condiciones hay poca disponibilidad de Ca, Zn y MO. El Zn correlacionó positivamente con el Ca, MO, % de arcilla y CIC; según Fassberder y Bornemisza (1987), el Zn se correlaciona negativamente con el Ca y positivamente con % de arcilla. La MO correlacionó positiva y significativamente con el porcentaje de arcilla, este comportamiento también fue reportado por Rojas (1976) en suelos ácidos de Chile. También la MO y la CIC correlacionaron positivamente, se explica porque la MO contribuye con el intercambio de cationes (Casanova, 2005).

Cuadro 3.2: Correlaciones significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre las variables de suelo; utilizando el programa Infostat.

	<b>pH</b>	<b>Al</b>	<b>Zn</b>	<b>Ca</b>	<b>MO</b>	<b>Arcilla</b>
<b>Al</b>	-0,31					
<b>Zn</b>	-----	-0,40				
<b>Ca</b>	0,47	-0,49	0,54			
<b>MO</b>	-----	-0,35	0,59	0,79		
<b>Arcilla</b>	0,53	-0,51	0,63	0,84	0,78	
<b>CIC</b>	0,52	-0,52	0,57	0,99	0,80	0,88

### 3.2. Fraccionamiento de P en los suelos evaluados

El fraccionamiento químico del P permitió conocer las diferentes formas que existen en el suelo, las cuales, constituyen reservorios de distinta naturaleza; de inmediata, mediana o baja disponibilidad para la planta.

### 3.2.1 Fósforo Inorgánico (Pi)

En el cuadro 3.3 se presentan las fracciones inorgánicas de P en los 43 suelos, repartidos en: P resina (PiR) con un promedio de  $1,14 \text{ mg.kg}^{-1}$ , el 60% de los suelos mostraron valores  $\leq 0,80 \text{ mg.kg}^{-1}$ ; el promedio de P en bicarbonato de sodio (PiL) fue  $9,38 \text{ mg.kg}^{-1}$ , el 60% de los suelos presentaron valores  $\leq 10 \text{ mg.kg}^{-1}$ . El fósforo encontrado en las fracciones inorgánicas de resina y bicarbonato son parecidos al reportado por Hernández y Bautis (2005), en suelos de sabana de Uverito. El PiR determinado en este trabajo es 15 veces menor al valor mostrado por Boschetti et al. (2003) en suelos ácidos de Argentina y el PiL es la mitad del valor obtenido acá. El PiR y el PiL fueron 3 veces menores al reportado por Fernández y Turrión (2011) en un suelo Ultisol de Lara fertilizado con SFT y en un suelo Alfisol de Yaritagua fertilizado con SFT, el PiR fue 30 veces mayor al determinado en nuestro estudio y el PiL fue 4,6 veces mayor al promedio reportado acá. El promedio de P en hidróxido de sodio (PiML) fue de  $50,53 \text{ mg.kg}^{-1}$ , el 60% de los suelos presentaron valores  $\leq 50 \text{ mg.kg}^{-1}$ ; el PiML extraído por Boschetti et al. (2003) es cinco veces menor a el reportado en este trabajo. El Pi ML fue igual al reportado por Fernández y Turrión (2011) en el suelo Alfisol de Yaritagua y 4 veces menor al suelo Ultisol de Lara. El promedio de P en ácido clorhídrico 1M (PiLL) fue de  $33,05 \text{ mg.kg}^{-1}$  y el 72 % de los suelos presentaron valores  $\leq 33 \text{ mg.kg}^{-1}$ ; Fernández y Turrión (2011) mostraron que el PiLL en el Alfisol fue de  $71 \text{ mg.kg}^{-1}$  y de  $23 \text{ mg.kg}^{-1}$  en el Ultisol; con respecto a la extracción con ácido clorhídrico concentrado (PiO) el promedio fue de  $120,22 \text{ mg.kg}^{-1}$ , 51 % de los suelos presentaron valores  $\geq 120 \text{ mg.kg}^{-1}$ ; Fernández y Turrión (2011) mostraron que el PiO en el Alfisol fue de  $100 \text{ mg.kg}^{-1}$  y de  $128 \text{ mg.kg}^{-1}$  en el Ultisol; el P extraído mediante la digestión con ácido sulfúrico-peróxido (PiRC) el promedio fue de  $81,89 \text{ mg.kg}^{-1}$ , el 49 % de los suelos presentaron valores  $\geq 82 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Hernández y Bautis (2005), mostraron que el PiRC fue de  $42,7 \text{ mg.kg}^{-1}$  en suelos de sabana y  $41,3 \text{ mg.kg}^{-1}$  en suelos con pinares. El fósforo promedio encontrado en la fracción de HCl 1M y en la fracción residual se parece mucho a los valores promedios mostrado por Boschetti et al. (2003) en un análisis de 13 suelos, ácidos de la Mesopotamia Argentina. El Pi total (PiT) se calculó como la suma de

todas las fracciones inorgánicas y varió desde 89,60 mg.kg<sup>-1</sup> hasta 608,08 mg.kg<sup>-1</sup>. Hernández y Bautis (2005), mostraron que el PiT fue de 55,4 mg.kg<sup>-1</sup> en suelos de sabana y 53,5 mg.kg<sup>-1</sup> en suelos de sabanas con pinares.

Cuadro 3.3: Fracciones de fósforo inorgánico en 43 suelos bajo cultivo de arroz.

Muestra	Fracciones de P(mg.kg <sup>-1</sup> )						
	PiR	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC	PiT
sue-01	0,55	16,60	89,76	57,87	131,55	64,67	361,00
sue-02	0,57	13,51	30,36	18,67	33,64	34,54	131,28
sue-03	0,18	4,38	52,47	9,85	36,26	42,30	145,44
sue-04	1,05	11,70	93,26	71,94	209,66	125,55	513,17
sue-05	0,50	8,70	30,17	22,66	121,36	88,97	272,34
sue-06	0,98	12,09	53,84	66,41	110,83	83,75	327,91
sue-07	0,85	6,63	21,96	12,84	117,94	68,64	228,86
sue-08	0,80	7,69	49,64	18,22	174,87	120,67	371,88
sue-09	0,52	9,84	73,74	63,53	192,84	122,06	462,52
sue-10	0,62	10,11	52,65	24,58	161,12	102,64	351,72
sue-11	0,85	9,18	44,41	23,77	99,55	68,66	246,42
sue-13	0,63	3,70	18,47	9,97	203,08	128,70	364,54
sue-14	12,71	23,62	113,03	135,36	134,13	93,62	512,47
sue-16	1,08	5,42	31,31	26,70	156,94	114,51	335,96
sue-17	0,88	4,49	33,60	17,43	114,96	101,27	272,64
sue-18	1,40	7,28	65,63	30,16	235,29	98,51	438,26
sue-19	0,57	4,98	62,66	21,77	179,81	87,82	357,61
sue-20	0,52	3,11	28,89	10,11	118,63	63,87	225,13
sue-21	0,49	5,23	30,74	12,35	60,92	48,31	158,04
sue-22	0,60	3,83	43,67	9,76	77,03	65,40	200,28
sue-23	0,64	4,91	65,89	44,93	166,74	95,31	378,41
sue-24	1,10	9,26	22,28	9,49	26,25	35,50	103,88



Muestra	Fracciones de P(mg.kg <sup>-1</sup> )						
	PiR	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC	PiT
sue-26	0,51	7,11	32,77	19,51	45,98	62,64	168,52
sue-27	0,34	5,51	22,48	8,48	29,85	47,87	114,54
sue-28	0,78	4,97	36,09	28,89	157,78	112,92	341,43
sue-29	0,92	4,84	35,65	15,83	230,22	100,37	387,83
sue-30	1,73	24,41	109,92	59,99	121,62	65,34	383,02
sue-31	0,31	5,65	25,58	1,93	29,49	44,58	107,53
sue-33	0,52	10,81	46,32	16,30	125,52	59,18	258,65
sue-34	0,42	11,20	40,21	7,68	64,64	56,13	180,28
sue-35	1,04	20,63	61,72	32,09	53,76	46,17	215,42
sue-36	1,01	6,21	45,33	19,69	207,50	121,91	401,65
sue-37	3,02	13,26	95,03	86,05	104,31	149,68	451,35
sue-38	2,03	15,26	98,64	95,41	116,71	114,94	442,99
sue-40	0,18	3,99	25,87	1,77	48,26	47,19	127,26
sue-41	0,32	6,03	48,17	31,49	128,61	127,09	341,71
sue-43	0,47	10,80	40,97	20,31	165,07	67,19	304,81
sue-44	0,38	10,08	50,53	35,91	152,51	92,96	342,37
sue-45	1,90	21,17	76,75	77,52	106,76	69,79	353,87
sue-46	0,35	5,54	15,58	9,63	23,52	34,99	89,60
sue-47	0,58	10,28	35,58	31,58	44,91	46,67	169,60
sue-48	3,75	15,31	97,54	90,63	256,33	144,52	608,08
sue-49	0,29	4,20	23,79	12,13	92,53	53,73	186,67
<b>Promedio</b>	<b>1,14</b>	<b>9,38</b>	<b>50,53</b>	<b>33,05</b>	<b>120,22</b>	<b>81,89</b>	<b>296,21</b>
<b>SD</b>	<b>1,94</b>	<b>5,51</b>	<b>26,51</b>	<b>29,86</b>	<b>63,32</b>	<b>32,45</b>	<b>127,80</b>
<b>Máximo</b>	<b>12,71</b>	<b>24,41</b>	<b>113,03</b>	<b>135,36</b>	<b>256,33</b>	<b>149,68</b>	<b>608,08</b>
<b>Mínimo</b>	<b>0,18</b>	<b>3,11</b>	<b>15,58</b>	<b>1,77</b>	<b>23,52</b>	<b>34,54</b>	<b>89,60</b>
<b>C.V (%)</b>	<b>171</b>	<b>59</b>	<b>52</b>	<b>90</b>	<b>53</b>	<b>40</b>	<b>43</b>

PiR: Resina, PiL: Bicarbonato, PiML: Hidróxido de sodio, PiLL: Ácido Clorhídrico diluído, PiO: Ácido Clorhídrico concentrado, PiRC: Ácido Sulfúrico-Peróxido, PiT: P inorgánico total

La desviación estándar determinada para cada fracción indicó que hay gran dispersión de los datos con respecto al valor promedio. Las fracciones que presentaron mayor dispersión con respecto a la media fueron:  $PiO > PiRC > PiLL > PiML > PiL > PiR$ . La fracción extraída con  $H_2SO_4-H_2O_2$  fue la que presentó menor CV (40%), lo que indicó la gran heterogeneidad que presentaron las 43 parcelas; ya que CV superiores a 20 % indican que el promedio no es representativo de los datos o que éstos no son homogéneos (Spiegel, 1991); los altos valores en CV se justifican, por que el estudio se llevo a cabo en 43 parcelas cultivados con arroz que presentaron diferencias en sus suelos y además siguieron manejos agronómicos distintos.

Para medir si el contenido de P determinado en cada fracción inorgánica estaban contenido en una curva de distribución normal para un nivel de confianza de 95 % ( $media \pm 2SD$ ), se calculó el porcentaje de datos que estuvieron contenidos bajo esa área: resina 97,7 %;  $NaHCO_3$  90,7 %; NaOH y HCl 1M 95,3%; HCl concentrado y  $H_2SO_4-H_2O_2$  97,7 %; lo que indica que más del 90% de los datos están contenidos en el 95 % de la curva de distribución normal.

### 3.2.2 Fósforo Orgánico (Po)

En el cuadro 3.4 se observa las fracciones orgánicas de los 43 suelos, las cuales se distribuyeron así: bicarbonato de sodio (PoL), con promedio de  $11,52 \text{ mg.kg}^{-1}$ , el 70% de los suelos presentaron valores  $\leq 11 \text{ mg.kg}^{-1}$ ; Hernández y Bautis (2005), mostraron que el PoL fue de  $4,0 \text{ mg.kg}^{-1}$  en suelos de sabana y  $4,7 \text{ mg.kg}^{-1}$  en suelos con pinares; Fernández y Turrión (2011) reportaron en el Ultisol de Lara  $31 \text{ mg.kg}^{-1}$  y en el Alfisol  $9 \text{ mg.kg}^{-1}$ . La fracción de hidróxido de sodio (PoML) alcanzó un valor promedio de  $35,40 \text{ mg.kg}^{-1}$ , el 65% de los suelos presentaron valores  $\leq 35 \text{ mg.kg}^{-1}$ ; Hernández y Bautis (2005), mostraron que el PoML fue de  $4,1 \text{ mg.kg}^{-1}$  en suelos de sabana y  $8,6 \text{ mg.kg}^{-1}$  en suelos con pinares, Fernández y Turrión (2011) reportaron en el Ultisol de Lara  $132 \text{ mg.kg}^{-1}$  y en el Alfisol  $27 \text{ mg.kg}^{-1}$ ; la fracción de ácido clorhídrico 1 M (PoLL), con promedio de  $5,63 \text{ mg.kg}^{-1}$ , el 50

% de los suelos presentaron valores  $\leq 5 \text{ mg.kg}^{-1}$ ; ácido clorhídrico concentrado (PoO), con promedio de  $14,98 \text{ mg.kg}^{-1}$ , el 44 % de los suelos mostraron valores  $\leq 15 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Hernández y Bautis (2005), mostraron que el PoO fue de  $11,1 \text{ mg.kg}^{-1}$  en suelos de sabana y  $11,4 \text{ mg.kg}^{-1}$  en suelos con pinares. El Po (P orgánico) total se calculó como la suma de todas las fracciones orgánicas y varió de  $43,23 \text{ mg.kg}^{-1}$  hasta  $118,86 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Al comparar los valores de P orgánico con dos suelos Vertisoles, reportado por Cross y Schlesinger (1995), se encontró que en el P orgánico total mostrado por ellos fue de  $70 \text{ mg.kg}^{-1}$  y de  $45 \text{ mg.kg}^{-1}$ ; estos resultados son bajos al compararlos con los resultados de los suelos arroceros del Sistema del Río Guárico.

Los valores promedio de Po obtenido en la fracción de bicarbonato de sodio son semejantes, a los mostrados por Boschetti et al. (2003) en suelos ácidos de Argentina, pero los valores de PoML y de PoO obtenidos son muy inferiores a los mostrados por ellos.

La SD determinada en cada fracción indica que hay gran dispersión de los datos con respecto al valor promedio. Las fracciones que presentaron mayor dispersión con respecto a la media fueron: PoML > PoO > PoLL > PoL. La fracción extraída con NaOH fue la que presentó menor coeficiente de variación 41%; valores superiores a 20 % en el CV, indica que los datos son heterogéneos (Spiegel, 1991).

Cuadro 3.4: Fracciones de fósforo orgánico en 43 suelos bajo cultivo de arroz.

Muestras	Fracciones de P ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )				
	PoL	PoML	PoLL	PoO	PoT
sue-01	64,7	3,0	24,5	3,1	54,86
sue-02	34,5	18,9	24,2	5,0	65,68
sue-03	42,3	24,3	29,1	0,9	71,01
sue-04	125,6	18,0	29,4	6,0	76,29
sue-05	89,0	25,8	18,4	6,3	67,39
sue-06	83,8	12,4	28,4	2,2	67,99

Muestras	Fracciones de P (mg.kg <sup>-1</sup> )				
	PoL	PoML	PoLL	PoO	PoT
sue-07	68,6	22,8	15,4	3,7	54,56
sue-08	120,7	30,7	30,3	3,2	93,13
sue-09	122,1	24,3	56,6	2,9	108,87
sue-10	102,6	13,7	60,2	5,5	97,90
sue-11	68,7	10,7	30,2	6,2	59,06
sue-13	128,7	9,3	24,8	3,5	56,44
sue-14	93,6	8,4	49,7	9,2	82,85
sue-16	114,5	8,7	44,1	5,8	73,76
sue-17	101,3	10,2	87,8	5,0	118,86
sue-18	98,5	12,1	21,4	14,1	71,92
sue-19	87,8	10,8	45,4	4,2	66,05
sue-20	63,9	9,2	33,9	5,6	51,59
sue-21	48,3	11,4	29,8	4,5	45,97
sue-22	65,4	11,0	67,9	2,5	87,27
sue-23	95,3	16,4	33,4	11,2	66,28
sue-24	35,5	12,2	23,8	5,7	43,55
sue-26	62,6	9,4	22,6	5,8	52,38
sue-27	47,9	10,8	23,6	4,1	47,19
sue-28	112,9	8,9	21,4	6,7	57,98
sue-29	100,4	7,6	18,8	2,5	57,41
sue-30	65,3	7,2	27,3	5,0	57,99
sue-31	44,6	8,3	23,2	2,8	43,23
sue-33	59,2	9,5	33,0	2,1	56,02
sue-34	56,1	10,1	33,2	2,6	57,90
sue-35	46,2	9,2	29,3	0,6	55,39
sue-36	121,9	6,6	29,5	4,4	56,39

Muestras	Fracciones de P (mg.kg <sup>-1</sup> )				
	PoL	PoML	PoLL	PoO	PoT
sue-37	149,7	8,9	56,0	6,9	82,19
sue-38	114,9	8,5	48,7	8,4	85,82
sue-40	47,2	9,0	39,6	2,7	58,79
sue-41	127,1	10,7	45,3	5,9	79,72
sue-43	67,2	6,1	33,3	3,7	53,38
sue-44	93,0	5,8	41,0	3,5	75,42
sue-45	69,8	4,1	50,9	1,8	78,56
sue-46	35,0	11,0	27,0	2,0	44,86
sue-47	46,7	9,5	38,6	4,7	61,55
sue-48	144,5	0,6	36,9	46,7	103,92
sue-49	53,7	9,5	34,4	2,8	56,26
<b>Promedio</b>	<b>11,52</b>	<b>35,40</b>	<b>5,63</b>	<b>14,98</b>	<b>67,53</b>
<b>SD</b>	<b>6,20</b>	<b>14,63</b>	<b>6,92</b>	<b>7,40</b>	<b>18,06</b>
<b>Máximo</b>	<b>30,66</b>	<b>87,83</b>	<b>46,69</b>	<b>29,05</b>	<b>118,86</b>
<b>Mínimo</b>	<b>0,58</b>	<b>15,42</b>	<b>0,59</b>	<b>0,32</b>	<b>43,23</b>
<b>C.V. (%)</b>	<b>54</b>	<b>41</b>	<b>123</b>	<b>49</b>	<b>27</b>

PoL: Bicarbonato, PoML: Hidróxido de sodio, PoLL: Ácido Clorhídrico diluido, PoO: Ácido Clorhídrico concentrado, PoT: P orgánico total

Para medir si el contenido de P determinado en cada fracción orgánica estaban contenido en una curva de distribución normal para un nivel de confianza de 95 % (media  $\pm$  2SD), se calculó el porcentaje de datos que estuvieron contenidos bajo esa área: NaHCO<sub>3</sub> 90,7 %; NaOH 95,4 %; HCl 1M 97,7% y HCl concentrado 100%; lo que indica que más del 90% de los datos están contenidos en el 95 % de la curva de distribución normal.

El P total se calculó como la suma de todas fracciones inorgánicas y orgánicas y varió desde 134,46 mg.kg<sup>-1</sup> hasta 712,01 mg.kg<sup>-1</sup>, con un valor promedio de 363,73 mg.kg<sup>-1</sup>, el

54% de del suelos presentaron valores por encima del promedio; estos contenidos de P son muy parecidos a los resultados de Boschetti et al. (2003) en suelos ácidos de Argentina, para siete órdenes de suelos; pero son relativamente bajos al compararlos con los resultados de Cross y Schlesinger (1995), para ocho ordenes de suelos. Hernández y Bautis (2005), mostraron que el P total fue de 76,4 mg.kg<sup>-1</sup> en suelos de sabana y 78,2 mg.kg<sup>-1</sup> en suelos con pinares; los valores bajos se asocian a que estos suelos ácidos son poco fertilizados con P, en cambio los suelos arroceros del Guárico son continuamente fertilizados. El promedio del P total para los 43 suelos evaluados fue de 363,73 mg.kg<sup>-1</sup> y se corresponde con lo reportado por Schmidt et al. (1996), (373 mg.kg<sup>-1</sup>) en un suelo ácido franco arcillo que fue fertilizado con 40 kg de P.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> por 11 años continuos. Los valores promedio del P total para los suelos arroceros del Guárico fueron menores a la mitad de los valores mostrados por Fabre et al. (2006), en suelos ácidos del desierto de Atacama; Fernández y Turrión (2011) mostraron que el P total en el Alfisol de Yaritagua fue de 365 mg.kg<sup>-1</sup> y de 612 mg.kg<sup>-1</sup> en el Ultisol de Lara.

El promedio de las fracciones de P alcanzaron el siguiente orden con respecto al porcentaje de P total: PiO (31,4%) > PiRC (22,9%) > PiML(13,9%) > PoML (10,7%) > PiLL (8,2%) > PoO (4,5%) > PoL (3,8%) > PiL (2,8%) > PoLL (1,5%) > PiR (0,3%).

### **3.3. Distribución Porcentual de las fracciones de P en el suelo**

#### **3.3.1 Análisis de varianza multivariado (MANOVA)**

Se aplicó el análisis de varianza multivariado mediante el programa MINITAB 15, con la finalidad de probar si se pueden asociar un conjunto de factores con otro de variables, de manera de establecer un modelo funcional que permita predecir el comportamiento de las variables con base a los factores. El MANOVA detecta si hay diferencias entre grupos a través de una combinación lineal de las variables dependientes. Además estudia si existen diferencias significativas entre las medias de las variables dependientes con los niveles de las variables independientes y sus interacciones.

Al asociar el contenido de P presente en las fracciones de inmediata disponibilidad (PiR), moderada disponibilidad (PiL, PiML, PiLL, PoL, PoML, PoLL) y las fracciones recalcitrantes (PiO, PoO, PiRC) con factores como el pH, materia orgánica, contenido de Ca y años de fertilización, se encontró que no se evidenció relación funcional entre las variables y los factores, de acuerdo con un nivel de significación de 5%. Además se realizó el análisis de varianza individual para PiR, PiL, PiML, PiLL, PoL, PoML, PoLL, PiO, PoO, PiRC y pH, materia orgánica, contenido de Ca y años de fertilización, encontrándose que no hubo efecto significativo de ningún factor sobre cada una de las variables, con el mismo nivel de significancia.

Debido a que no se pudo establecer un modelo para explicar las variaciones entre las distintas fracciones de P inorgánicas y orgánicas con respecto al pH, contenido de calcio, materia orgánica y años de fertilización fosfatada, se realizó un análisis de frecuencia para pH, contenido de calcio, materia orgánica y años de fertilización fosfatada, para reunir los suelos en cuatro grupos y así estudiar las variaciones de pH, contenido de calcio, materia orgánica y años de fertilización fosfatada con respecto a cada una de fracciones de P (Anexo 3).

### **3.3.2 Fracciones Inorgánicas**

#### **3.3.2.1 Efecto del pH sobre la distribución de las fracciones de Pi**

Para conocer el efecto del pH sobre la distribución de las formas de Pi en los diferentes suelos, éstos se reunieron arbitrariamente en cuatro grupos, tomando como base el pH más bajo (3,53) con incremento de 0,5 unidades de pH. En el primer grupo con rango de 3,52 a 5,02 se juntaron tres intervalos con un total de 5 muestras, entre 5,02 y 5,52 suelos moderadamente ácidos con 19 muestras, en el rango de 5,52 a 6,02, débilmente ácidos con 14 y entre 6,02 y 7,02 que podrían ser considerados como neutros, se unieron dos intervalos para un total de 5 muestras.

Para cada grupo de suelos se calculó el promedio en cada fracción de Pi (Anexo 3). En la figura 3.3 se muestra la distribución porcentual de las distintas fracciones de Pi en los cuatro grupos de suelos.

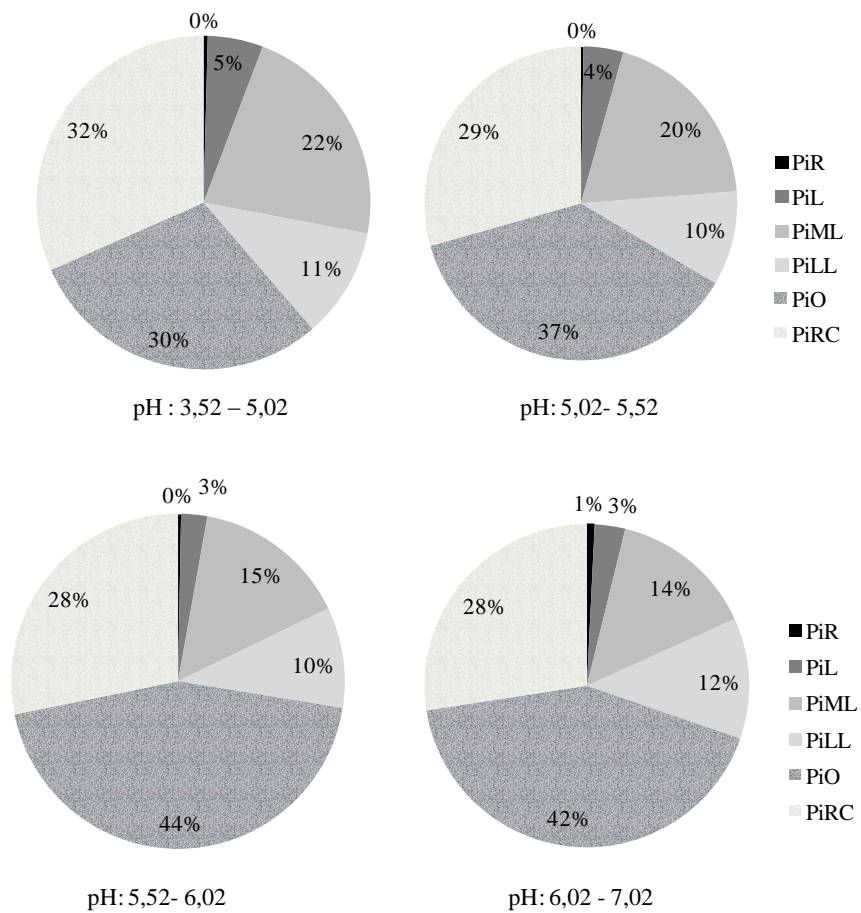


Figura 3.3 Distribución porcentual de las diferentes fracciones de Pi en los cuatro grupos de pH: 3,52-5,02; 5,02-5,52; 5,52-6,02 y 6,02-7,02.



El contenido de PiR fue muy bajo, osciló entre 0,4% en los suelos más ácidos (pH: 3,52-5,02) y 0,8 % en los de mayor pH (pH: 6,02-7,02). Estos datos indican que el P de inmediata disponibilidad para la planta fue muy bajo. Las fracciones de Pi lábiles (PiL, PiML y PiLL) disminuyeron con el incremento del pH desde 38% en los suelos más ácidos hasta 29% en los cercanos a la neutralidad. En cambio las fracciones no lábiles (PiO y PiRC), mostraron un comportamiento opuesto, se incrementaron con el aumento del pH, desde 62% en el rango de los más ácidos hasta el 70% en los suelos de pH más alto (Figura 3.3).

Al aumentar el pH disminuyeron las formas de P lábiles y moderadamente lábiles, las ligeramente lábiles que están ligadas al calcio no cambiaron significativamente y las formas ocluidas y recalcitrantes que forman parte de los minerales fosfáticos aumentaron. Esto se corresponde con lo reportado por Solórzano, 1997; Tan, 1998 y Bravo, 2000.

En general, las fracciones solubles (PiR) y lábiles (PiL, PiML y PiLL) representaron la menor proporción del Pi, en cambio los grandes reservorios de Pi, en estos suelos, se encontraron en formas recalcitrantes de poca disponibilidad para la planta.

### **3.3. 2.2 Efecto del calcio sobre la distribución porcentual de las fracciones de Pi en el suelo**

Los niveles de Ca encontrados en el suelo mostraron una amplia gama de valores, desde 49 mg.kg<sup>-1</sup> hasta 2811 mg.kg<sup>-1</sup>. Se considera que 400 mg.kg<sup>-1</sup> de Ca es un nivel alto en el suelo.

Con base en el análisis de frecuencia para el Ca disponible se agruparon los suelos en cuatro categorías, con intervalo de 600 mg.kg<sup>-1</sup>, el primer grupo estuvo entre 49 – 649, con 13 suelos, el segundo entre 649 - 1249, con 12 suelos, el tercer grupo entre 1249 - 1849 con 8 suelos y en el último grupo se juntaron los 8 suelos entre 1849 – 2449 y los 2 suelos con

Ca entre 2449 y 3049. Con los porcentajes en cada grupo de suelos se calculó el promedio de cada una de fracciones de Pi (Anexo 3) y se representaron en una gráfica de torta (Figura 3.4).

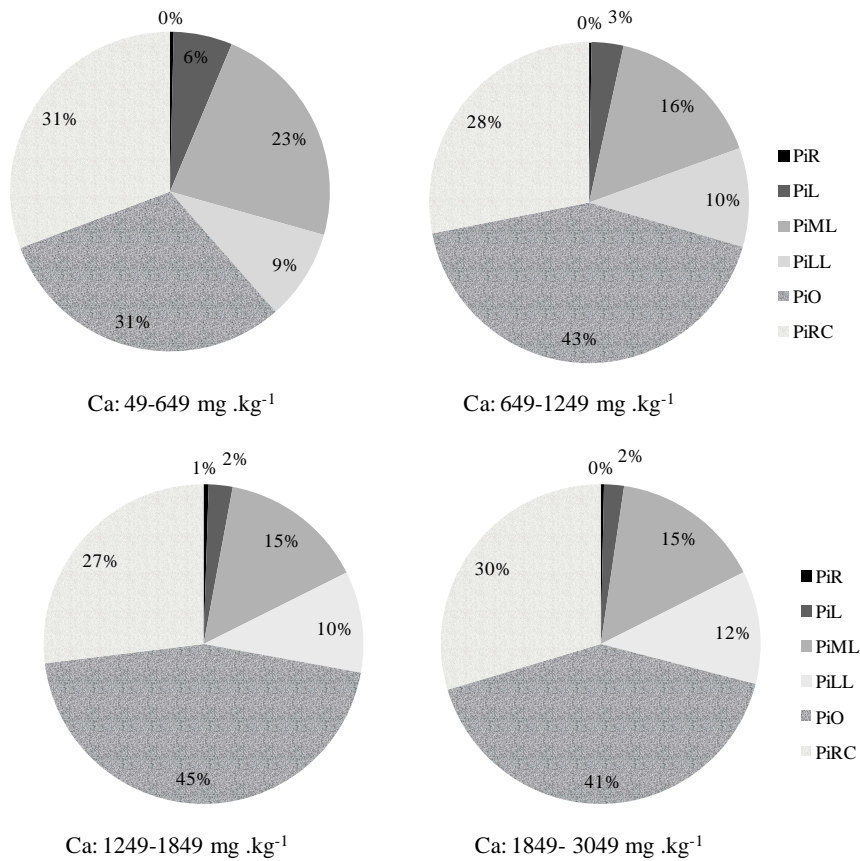


Figura 3.4 Distribución porcentual de las diferentes fracciones de Pi con respecto a los cuatro grupos de Ca disponible en el suelo.

Con el incremento del Ca en el suelo el PiL disminuyó de 6 % a 2 % y el PiML de 23 % a 15%. Este comportamiento podría explicarse porque al haber mayor disponibilidad de Ca en el suelo se forman más compuestos poco solubles en detrimento de las formas más lábiles. Las fracciones ligadas al Ca (PiLL) fueron similares en los cuatro grupos, alrededor de 10%.

La fracción de PiO se incrementó de 31 a 45 % con el aumento del contenido de Ca en el suelo, en cambio la fracción más recalcitrante (PiRC) mostró una pequeña disminución de 31 a 27 % con el aumento del Ca en el suelo, este comportamiento indica la formación de compuestos de calcio poco solubles o insolubles en el suelo, por consiguiente no disponibles para la planta.

En el rango de Ca en el suelos de 49-649 mg kg<sup>-1</sup> las fracciones lábiles (PiL, PiML, PiLL) correspondieron al 38 % del Pi total y las no lábiles (PiO y PiRC) 62 %; en los suelos con Ca disponible entre 649-1249 mg.kg<sup>-1</sup> las fracciones lábiles fueron 29% y las no lábiles 71%, en rango de Ca disponible entre 1249-1849 mg.kg<sup>-1</sup> las fracciones lábiles fueron 27% y las no lábiles de 72%, finalmente en los suelos con Ca disponible entre 1849-3049 mg.kg<sup>-1</sup> las fracciones lábiles fueron 29% y las no lábiles de 71%.

Los resultados muestran que con el incremento del contenido de calcio en el suelo, se produce una disminución de la formas de Pi lábil y al mismo tiempo se produce un aumento de las formas de Pi no lábiles, esto se corresponde con lo mostrado por Tan (1998) quien indica que el alto contenido de Ca hace que se formen precipitados de fosfatos de calcio en las superficies de las partículas del suelo, dando lugar a una disminución del Pi disponible para las plantas.

### **3.3.2.3 Efecto de la materia orgánica sobre la distribución de las fracciones de Pi en el suelo**

Con los datos de materia orgánica de los suelos se formaron cuatro grupos; de acuerdo al análisis de frecuencia, con intervalo de 0,5 % MO, el primer grupo estuvo entre 1,65-2,15

% MO, con 5 suelos, el segundo entre 2,15 - 2,65%, con 15 suelos, el tercero entre 2,65- 3,15% con 11 suelos y el último comprendido entre 3,15-4,15, acá se sumaron 9 suelos con MO entre 3,15- 3,65% con 3 suelos entre 3,65-4,15%. Determinados los porcentajes de cada fracción en cada grupo de suelos se calculó el promedio de cada fracción de Pi, los resultados se muestran en la figura 3.5

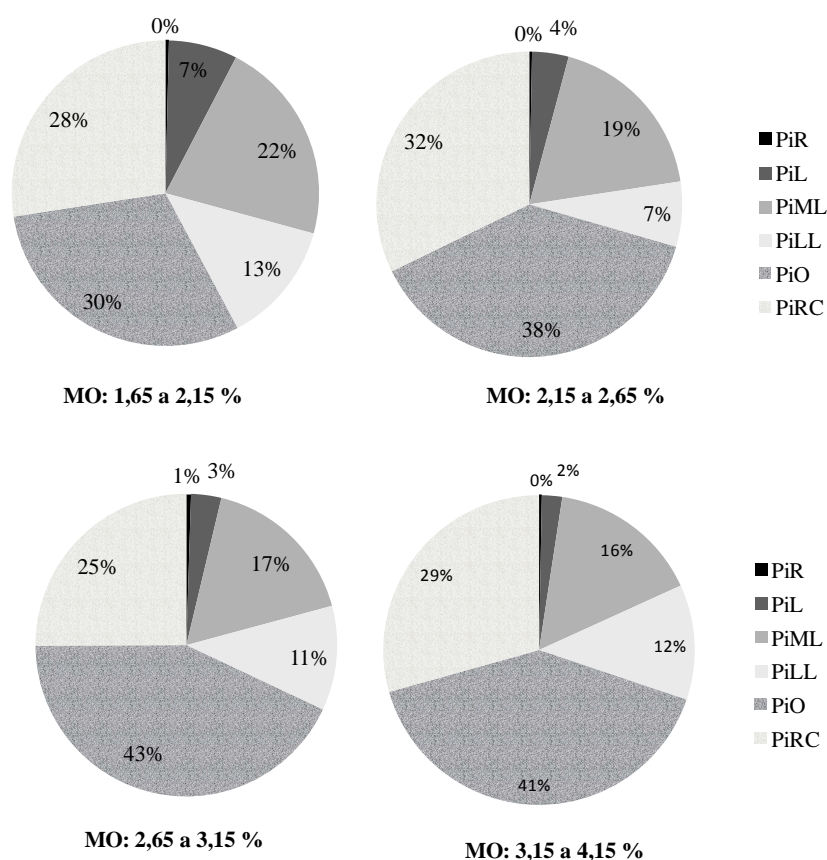


Figura 3.5 Distribución porcentual de las diferentes fracciones de Pi con respecto a los cuatro grupos de MO: 1,65-2,15%; 2,15-2,65%; 2,65-3,15% y 3,15-4,15 %.

El porcentaje de PiL en el primer grupo de suelos con el menor nivel de MO fue de 7%, y fue bajando en la medida que la MO se incrementó; en los suelos del segundo grupo bajó a 4 %, a 3 % en el tercer grupo y a 2 % en el cuarto grupo. El comportamiento del PiML fue parecido al de PiL respecto al contenido de MO de los suelos; se encontró que el 22% de

esta forma de Pi correspondía a los niveles más bajos de MO entre 2,15 a 2,65 %, con el incremento de la MO hasta el rango de 3,15 a 4,15, el porcentaje PiML llegó a su nivel más bajo de 16 % del Pi.

Las fracciones lábiles (PiL, PiML, PiLL) alcanzaron el 42 % y las fracciones no lábiles (PiO y PiRC) el 58 % del Pi total en el rango de 1,65-2,15 de MO, en el rango 2,15 a 2,65 las fracciones lábiles fueron 30% y las no lábiles 70 %, para el rango de 2,65 a 3,15 las fracciones lábiles fueron de 31 % y las fracciones no lábiles de 68% y, finalmente, para el rango de 3,15-4,15 las fracciones lábiles fueron de 30 % y las no lábiles 70 %.

La MO del suelo mostró tener una notable influencia sobre las formas de Pi, el mayor porcentaje del Pi lábil correspondió a los suelos con contenidos de MO menores a 2,15%, por encima de este nivel de MO las fracciones lábiles el Pi mostraron una disminución de la cuarta parte (Figura 3.4), en cambio las formas no lábiles se incrementaron con el aumento de la MO por encima del 2,15%.

La adición de residuos con alto contenido de P en suelos de Australia aumentó el contenido de la fracción PiML y PiLL, lo que sugiere que el P de estos residuos se trasladó al P de fracciones de menor disponibilidad (Alamgir et al., 2010). Esto se relaciona con lo encontrado en los suelos del Guárico, porque se determinó que a mayor contenido de MO mayor cantidad de PiO y PiRC (70%) que son fracciones de Pi no disponibles para las plantas. Al haber mayor contenido de residuos, también se produce mayor cantidad de CO<sub>2</sub>; el cual al disolverse en agua forma ácido carbónico, capaz de descomponer ciertos minerales presentes en el suelo que puede fijar el Pi. (Bravo, 2000).

#### **3.3.2.4 Efecto de los años de fertilización fosfatada sobre la distribución de las fracciones de Pi en el suelo**

La información sobre la fertilización fosfatada no fue completa para todas las parcelas trabajadas, sólo en 36 de ellas se pudo conocer el número de años que se viene aplicando fertilizante.

De acuerdo al análisis de frecuencia, los 36 suelos se agruparon en cuatro categorías, con intervalos de 12 años. El primer grupo que se formó estuvo entre 5-17 años con 10 suelos, el segundo entre 17-29 años con 4 suelos, el tercero entre 29-41 años con 16 suelos y el último entre 41-53 años con 6 suelos. Para cada grupo de suelos se calculó el porcentaje de cada fracción de Pi, respecto al P total, con el promedio de cada fracción Pi se realizó el gráfico de torta (Figura 3.6).

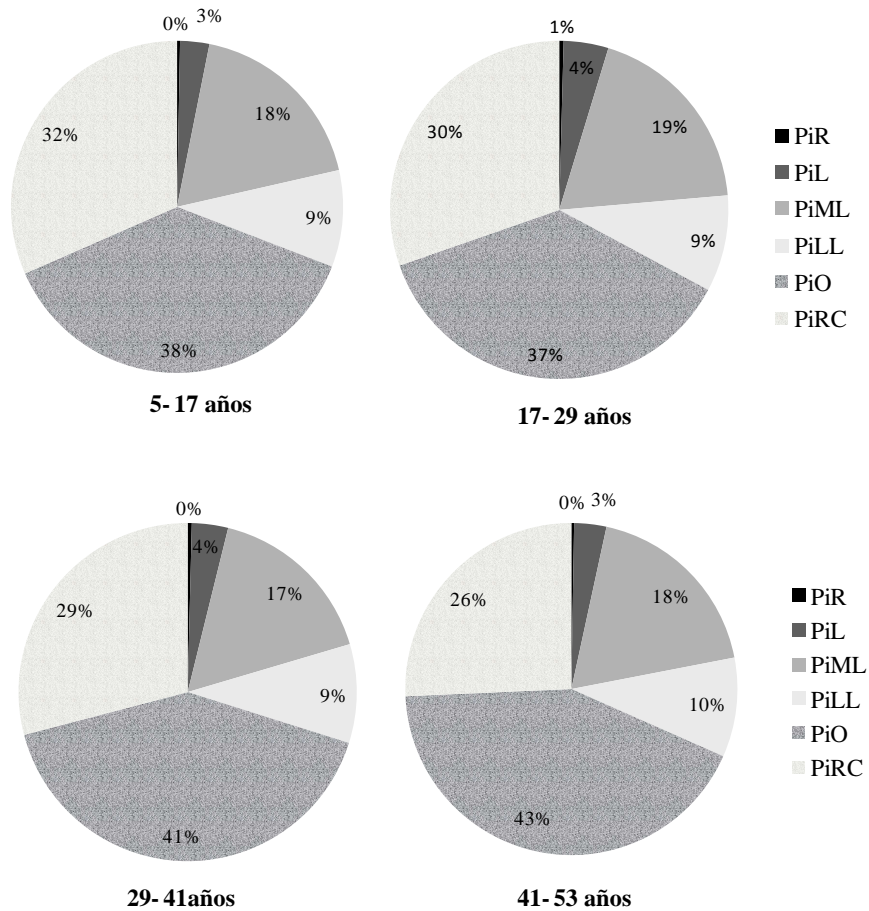


Figura 3.6 Distribución porcentual de las diferentes fracciones de Pi con respecto a los años de fertilización fosfatada en el rango: 5-17, 17-29, 29-31 y de 41-53 años.

En la figura 3.6 se muestra que las fracciones de PiL, PiML y PiLL representaron el 4, 18 y 9% del Pi; sin embargo, no cambiaron con los años de fertilización. El PiML fue aproximadamente 4,5 veces mayor que el PiL y dos veces mayor que el PiLL, a su vez éste último fue 2,25 veces mayor que el PiL. La fracción PiO fue la más abundante en todos los grupos y tendió a aumentar con los años de fertilización fosfatada, de 38 a 43% y la fracción de PiRC fue la segunda con mayor porcentaje de Pi, a diferencia de PiO tendió a disminuir con los años de fertilización, desde 32 a 26%.

Las fracciones lábiles (PiL, PiML, PiLL) alcanzaron el 30 % y las no lábiles (PiO y PiRC) el 70 % en los suelos fertilizados entre 5 y 17 años, donde se fertilizó entre 17 y 29 años las fracciones lábiles fueron 33% y las no lábiles 67 %, para los suelos fertilizados entre 29 y 41 años las fracciones lábiles fueron de 30 % y las no lábiles de 70%, y finalmente para el período de fertilización más largo se encontró que fracciones lábiles fueron de 31 % y las fracciones no lábiles de 69 %. Al parecer, los años de fertilización no ejercieron un efecto importante sobre las fracciones de Pi.

Se ha encontrado que el tiempo de contacto del fertilizante fosfatado con el suelo tiene que ver con la cantidad de P adsorbido y fijado en el suelo, debido a la deshidratación y reorientación de los cristales que contienen fosfatos (Brady, 1974; Solórzano, 1997; Bravo, 2000).

Takahashi y Anwar (2007), encontraron un incremento moderado del P disponible en el suelo Andosol cultivado con trigo luego de la fertilización con P por 23 años. La fertilización por largos periodos de tiempo en los suelos arroceros del Sistema de Riego de Río Guárico no influyó significativamente sobre las fracciones del P lábil, quizás porque en los lapsos de tiempo analizados ocurrieron transformaciones entre los fosfatos que hicieron imposible la visualización de la influencia del tiempo sobre las fracciones lábiles. Es conocido que el P proveniente de fertilizantes inorgánicos se fija en el suelo a las 24 horas de adicionado, en suelos de ordenes distintos (Ochwoh et al., 2005).

Schmidt et al. (1996), indicó que para un suelo ácido franco arcillo que fue fertilizado con 0, 10, 20, 30 y 40 kg de P.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> por 11 años continuos en cultivos de soya y maíz, el exceso de P aplicado pasó a formar parte de fracción PiML

Debido a que las fracciones más abundantes en estos suelos son de poco acceso para la planta, es muy importante medir el P disponible en el suelos para aplicar la dosis de fertilizante que complete los requerimientos del cultivo de arroz y así poder aprovechar el efecto residual que debe tener el Pi en estos suelos; a los cuales se le aplicó continuamente de P durante 50 años.

### **3.3.3 Fracciones de P orgánicas**

No se conocen con seguridad cuáles son los fosfatos orgánicos provenientes de la mineralización de la materia orgánica y de los exudados de las raíces, pero se sabe que hay una fracción lábil de la materia orgánica que contienen la fracción viva del suelo y los ácidos excretados por las raíces y hay otras fracciones menos lábiles. Entre éstas últimas fracciones de Po se encuentra la fracción extraída con NaOH, la cual contiene los fosfatos ligados a los ácidos húmicos y la fracción extraída con HCl concentrado que abarca los fosfatos ligados a las huminas, las cuales son sustancias complejas que se mineralizan muy poco (Navarro y Navarro, 2003; Labrador, 1996; Rivero, 1999).

Los datos de cada fracción de Po se agruparon en cuatro categorías de acuerdo al análisis de frecuencia realizado al pH, contenido de calcio, MO y años de fertilización fosfatada (Anexo 3); de la misma forma como se explicó para las fracciones inorgánicas, para cada grupo de suelos se determinó el promedio de cada fracción orgánica y se realizó el gráfico de torta.



### 3.3.3.1 Efecto del pH sobre la distribución porcentual de Po en el suelo

De acuerdo al análisis de frecuencia usado en el Pi, los suelos se agruparon en cuatro categorías o rangos de pH: 3,52-5,02 con 5 suelos, de 5,02 a 5,52 con 19 suelos, de 5,52 a 6,02 con 14 suelos y, finalmente, en el rango de 6,02 a 7,02 con 5 suelos. La figura 3.7 muestra la distribución porcentual del Po con respecto al grupo de suelos reunidos por el pH.

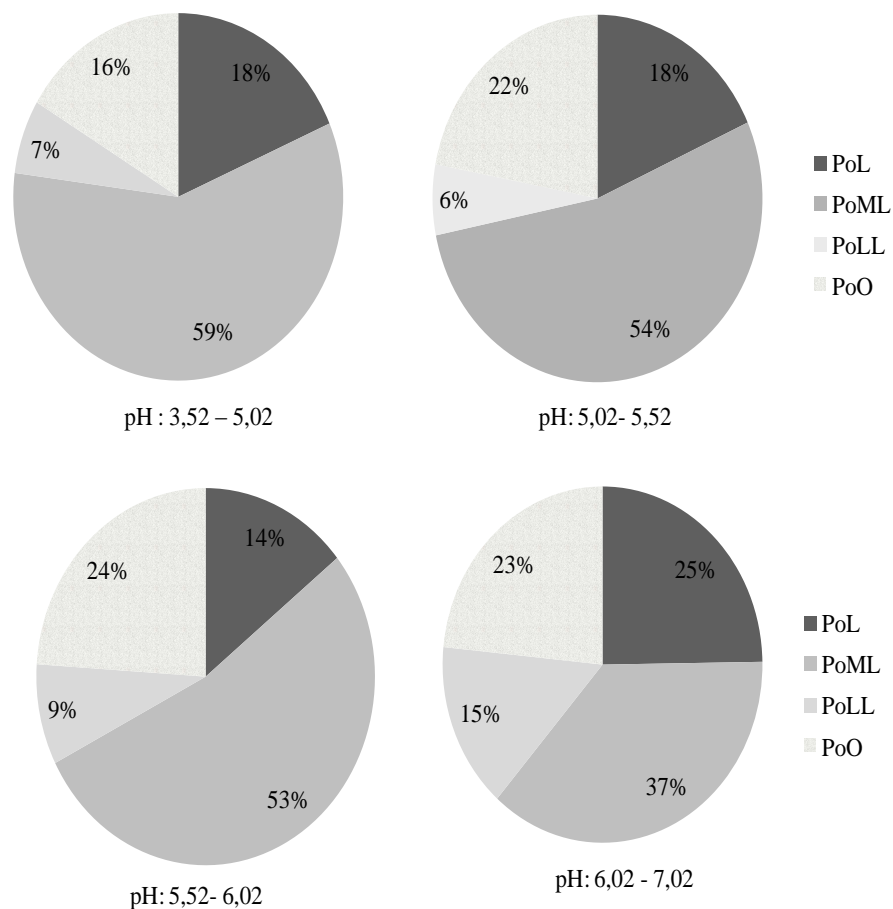


Figura 3.7 Distribución porcentual de las diferentes fracciones de Po en los cuatro rangos de pH: 3,52-5,02; 5,02-5,52; 5,52-6,02 y 6,02-7,02.

La fracción de PoL tendió a aumentar de 18 % a 25 % con el incremento del pH, el P obtenido en esta fracción podría ser fosfato de inositol que representa entre el 10 y 50% del P orgánico total, cuya mineralización ocurre por la acción de las enzimas fosfatasas (Havlin et al., 1999).

En cambio el PoML disminuyó notablemente con el aumento de pH en los suelos de 59% a 37%, lo que podría indicar que a pH más ácidos se podrían estar formando complejos fosfohumatos con Al y Fe del suelo predominantes a estos valores de pH, el metal sirve como enlace entre la molécula húmica y el ion fosfato (Tan, 1998). Esta fracción resultó con el mayor porcentaje en todos los grupos de suelos.

La fracción de PoLL varió de 7 % para el primer grupo de suelos hasta 15 % para los suelos con pH más altos cercanos a la neutralidad, la fracción de PoLL fue la más baja en todos los grupos, y concuerda con lo mostrado por Tieszen y Moir (1993). El PoO aumentó de 16% para los suelos con pH entre 3,52- 5,02 hasta 23 % (promedio) para los tres grupos de suelos restantes, en donde no hubo variación importante del contenido del PoO.

La fracción de PoL es dependiente del pH del suelo, debido a que los microorganismos de los suelos alcanzan mayor eficiencia, esto se corresponde con lo observado en el grupo de suelos con pH cercanos a la neutralidad (6,02-7,02), en los cuales el PoL aumentó hasta 25% (Tan, 1998), valores extremos de pH producen un descenso en la velocidad de mineralización.

Las fracciones de Po se agruparon en fracciones lábiles (PoL y PoML) y fracciones no lábiles (PoLL y PiO), las fracciones lábiles fueron afectadas por el incremento del pH de los suelos (Figura 3.7), bajando en forma sostenida de 77% en el rango de pH entre 3,52 y 5,52 a 62% en el rango más alto de 6,02 a 7,02. El comportamiento de las fracciones no lábiles mostró un comportamiento opuesto, éstas se incrementaron con la subida de pH desde 23% en el rango más ácido hasta 38% en el cercano a la neutralidad.

### 3.3.3.2 Efecto del contenido de calcio sobre la distribución porcentual del Po en el suelo

De acuerdo al análisis de frecuencia, los suelos se agruparon en cuatro categorías como en el caso del Pi. La figura 3.8 muestra la distribución porcentual de Po con respecto al contenido de Ca disponible de los suelos.

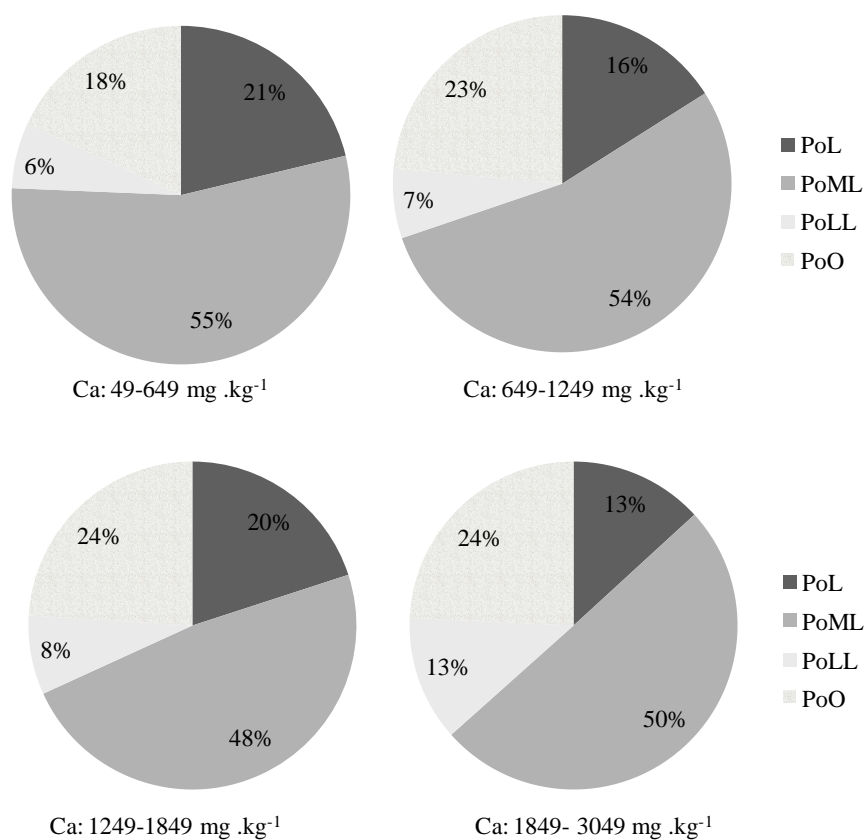


Figura 3.8 Distribución porcentual de las diferentes fracciones de Po con respecto a los cuatro grupos de Ca disponible en el suelo.

Se observó que el grupo de suelos con menor contenido de Ca disponible ( $49 - 649 \text{mg.kg}^{-1}$ ) presentó mayor porcentaje de PoL (21%) pero cuando el contenido de Ca fue más alto,  $1849 - 3049 \text{mg.kg}^{-1}$ , el PoL fue menor (13%); este comportamiento se podría explicar porque el Ca es capaz de formar compuestos insolubles entre los grupos carboxílicos o hidroxilo del fosfato al servir como enlace.

La fracción de PoML representó entre el 48 y 55% del Po en los suelos, los valores más altos de 54 y 55% correspondieron a los suelos menos ricos en calcio. La menor contribución al Po total correspondió a la fracción PoLL, con solamente un aporte entre 6 a 13 por ciento, siendo mayor en los suelos más ácidos.

El porcentaje de PoO fue menor a bajas concentraciones de Ca pero se incrementó de 18 a 23% al subir el Ca en el suelo.

Las fracciones lábiles (PoL y PoML) alcanzaron 76 % y las fracciones no lábiles (PoO y PoLL) el 24 % , cuando el Ca estuvo entre  $49-649 \text{mg.kg}^{-1}$ ; en los suelos con Ca disponible entre  $649-1249 \text{mg.kg}^{-1}$  las fracciones lábiles fueron de 70% y las fracciones no lábiles de 30%, con Ca disponible entre  $1249-1849 \text{mg.kg}^{-1}$  las fracciones lábiles fueron de 68% y las fracciones no lábiles de 32%, finalmente, en los suelos con Ca disponible entre  $1849-3049 \text{mg.kg}^{-1}$  las fracciones lábiles fueron de 63% y las fracciones no lábiles de 37%.

Es importante destacar que la proporción de fracciones lábiles disminuyeron con el incremento del contenido del Ca del suelo, sin embargo, estas fracciones representan más del 63% del Po, lo que produciría un efecto beneficioso sobre el P disponible en el mediano plazo.

### 3.3.3.3 Efecto de la materia orgánica sobre la distribución de las fracciones de Po en el suelo

De acuerdo al análisis de frecuencia los suelos se agruparon en cuatro categorías de la misma forma que para el Pi. En cada grupo de suelos se determinó el porcentaje de cada fracción de Po y con el promedio se realizó el gráfico de torta.

El porcentaje de PoL disminuyó desde aproximadamente 22% hasta 15% cuando el contenido de MO fue mayor a 2,65% lo que pudiera indicar que el incremento de MO favorece la formación de complejos de Po de menor solubilidad. La fracción PoML no mostró cambios de importancia con la variación de la MO; sin embargo, ésta fue la fracción de mayor importancia del Po, los porcentajes fueron altos, 50 a 54% del Po total. El PoLL fue la fracción más pequeña del Po total, varió entre 5 y 11%, al incrementarse la MO del suelo. La fracción orgánica menos soluble PoO mostró ser muy estable con el cambio de MO y representó aproximadamente la cuarta parte del Po total en el suelo (Figura 3.9).

Las fracciones lábiles (PoL y PoML) alcanzaron el 75 % del Po total extraído y la no lábil (PoLL y PoO) el 25 % en los suelos de bajo contenido de MO (1,65 a 2,15 %), las fracciones lábiles tendieron a disminuir con el incremento de la MO hasta un 68% en los suelos más ricos en MO, paralelamente la fracción menos soluble, PoO, fue estable con el cambio del contenido de MO en el suelo.

Al aumentar el contenido de MO las fracciones lábiles disminuyeron. La proporción de estas fracciones es superior al 65% en estos suelos, lo que resulta en una reserva de P a mediano plazo.

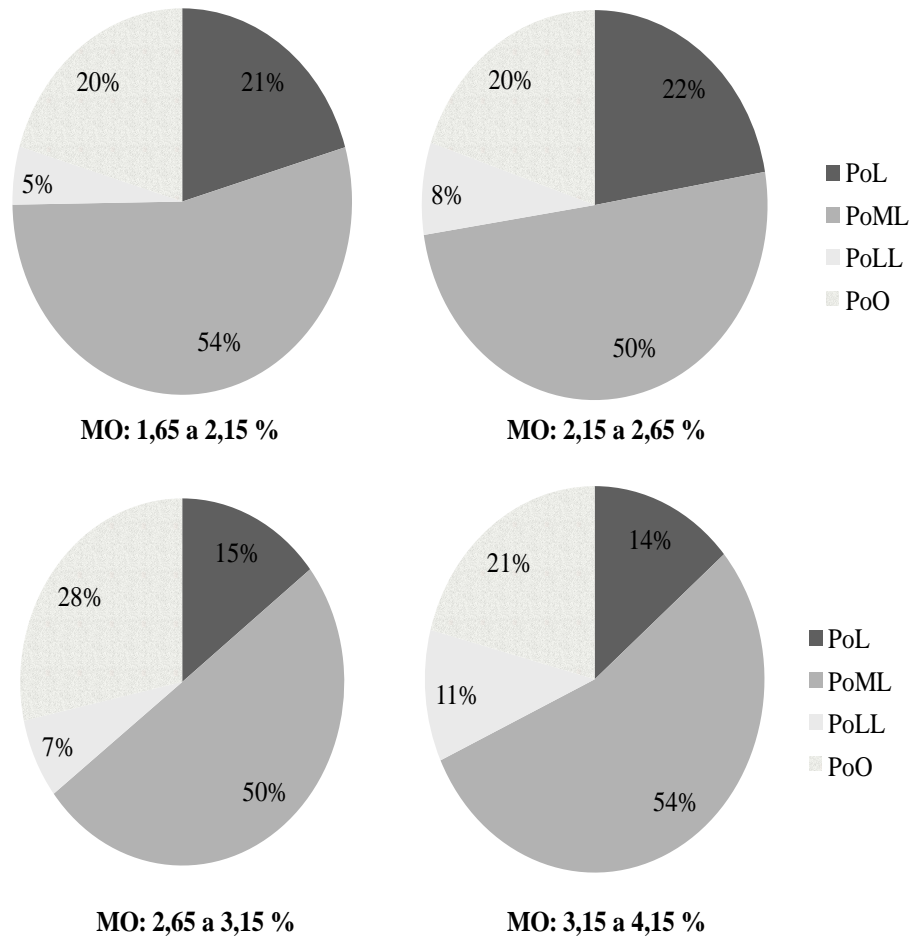


Figura 3.9 Distribución porcentual de las diferentes fracciones de Po con respecto a cuatro grupos de MO en el suelo.

### 3.3. 3.4 Efecto de los años de fertilización fosfatada sobre la distribución porcentual de las fracciones de Po en el suelo

De acuerdo al análisis de frecuencia, los suelos se agruparon en cuatro categorías como en el caso del Pi. Al analizar las fracciones de Po entre los cuatro grupos de suelos, formados con diferentes años de fertilización, se observó un cambio pequeño en el PoL como

producto de los años de aplicación de fertilizantes, entre 16 y 22% del Po total. La fracción PoML fue la más abundante, entre 49 y 58% del total, pero con poca variación entre grupos de años, al igual que el PoLL, ésta última fracción mostró ser la forma más pequeña de todas, de 6 a 8% (Figura 3.10).

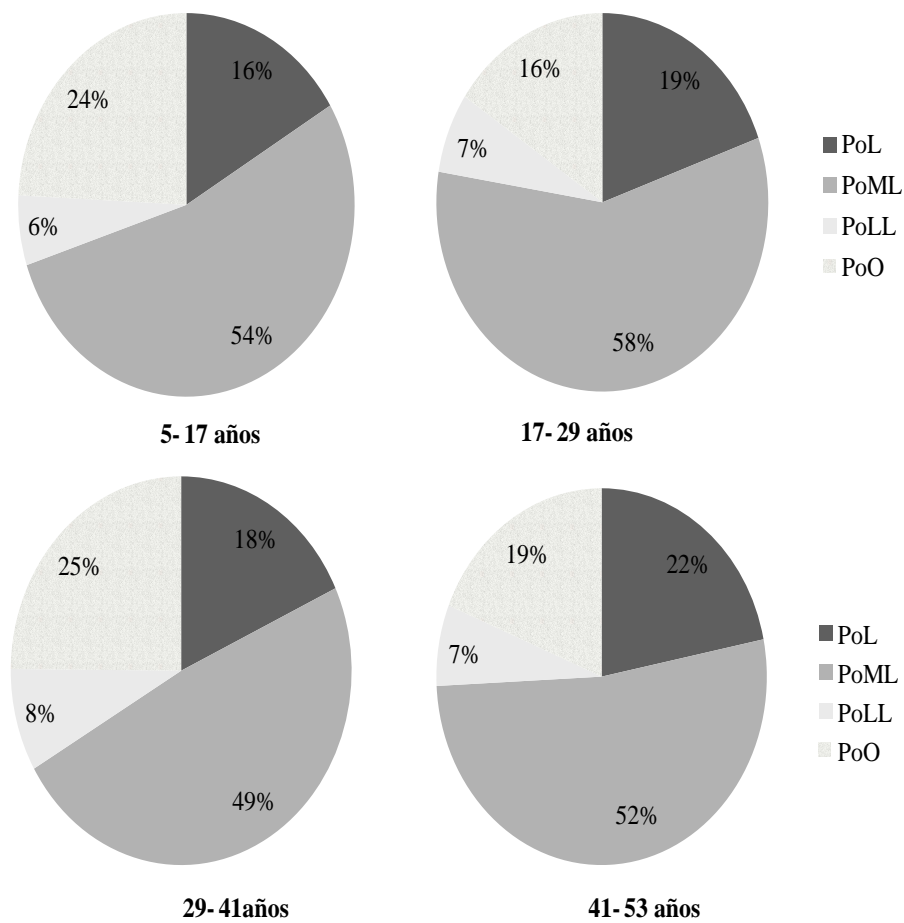


Figura 3.10 Distribución porcentual de las diferentes fracciones de Po con respecto a los años de fertilización fosfatada en el rango: 5-17, 17-29, 29-31 y de 41-53 años

Las fracciones lábiles (PoLy PoML) alcanzaron el 70 % y las fracciones no lábiles (PoLL y PoO) el 30 % en el primer grupo de suelos fertilizado entre 5 y 17 años, en los suelos fertilizados entre 17 y 29 años las fracciones lábiles fueron 77% y las no lábiles 23 %, para los suelos fertilizados entre 29 y 41 años las fracciones lábiles fueron de 67% y las fracciones no lábiles de 33%, en los suelos fertilizados entre 41 y 53 años las fracciones lábiles fueron de 74 % y las fracciones no lábiles de 26%.

Takahashi y Anwar (2007), encontraron que no hubo diferencia entre las fracciones de P orgánico en el suelo cultivado con trigo, luego de la aplicación de distintas combinaciones de N, P y K por 23 años.

En todos los grupos la fracción más abundante fue la de PoML; esta fracción es la que está ligada a los ácidos húmicos y muchas veces es resistente a la degradación por microorganismos (Havlin et al.1999); esta situación se acentúa bajo condiciones de inundación, donde la falta de oxígeno da lugar a una menor eficiencia de los microorganismos en el proceso de degradación de la materia orgánica (Rivero, 1999). También se observó, en todos los grupos de suelos que la fracción menos abundante fue PoLL; esto se corresponde con los resultados presentados por Tiessen y Moir (1993).

### **3.3.4 Relaciones entre las fracciones de Pi y Po**

La figura 3.11 muestra la comparación entre la distribución de las fracciones de Pi y Po: P lábil (L), P moderadamente lábil (ML), P ligeramente lábil (LL) y P ocluido (O) para los 43 suelos evaluados. El orden asignado a las parcelas está en función de las concentraciones de P.



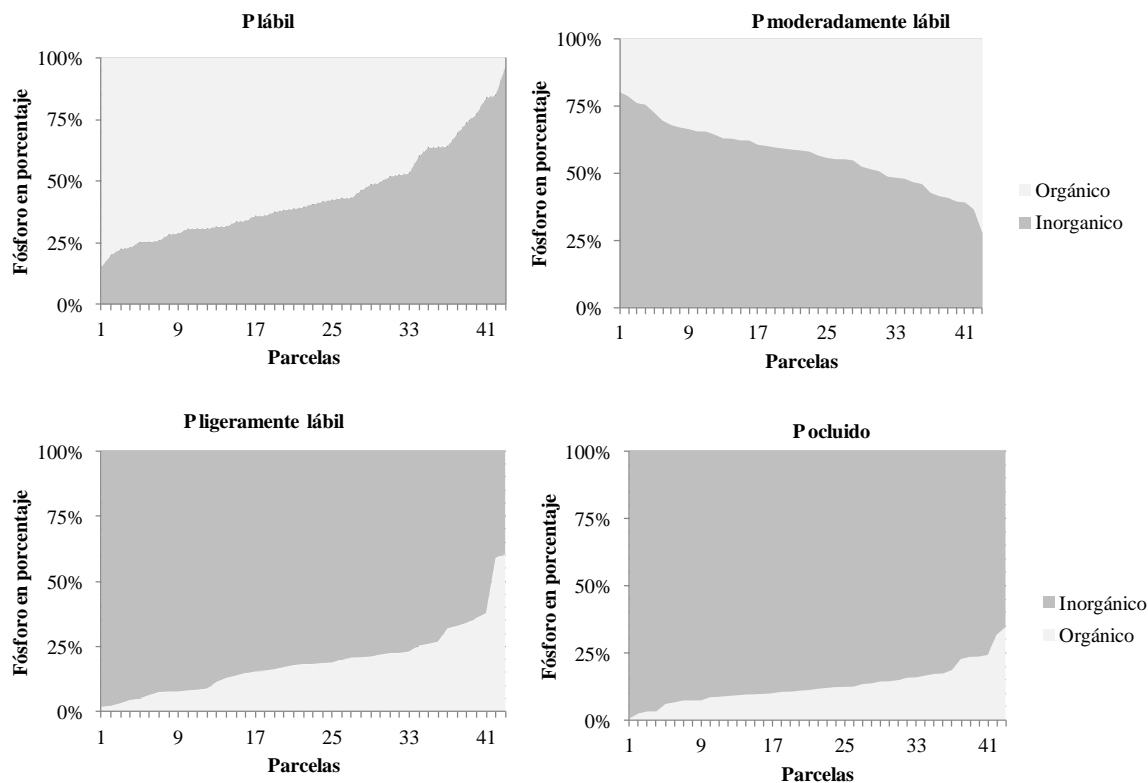


Figura 3.11 Distribución del Pi y Po en las fracciones L, ML, LL y O.

El Pi lábil en los 43 suelos varió entre 15 y 96 % del P lábil total. En 30 de los 43 suelos se encontró que más de 50 % del PL estaba como Po (Figura 3.11). Este comportamiento podría atribuirse a la incorporación de los restos de cosecha en el proceso de batido durante la preparación para la siembra. Tiessen y Moir (1993) señalaron que el Po lábil es una fracción de moderada mineralización y disponibilidad para la planta y microorganismos del suelo. El comportamiento de las fracciones de PML fue diferente, el Pi varió entre 28 y 80 %, 31 parcelas mostraron que el Pi fue mayor a 50% del PML total; lo cual significa un reservorio muy importante de P de mediana disponibilidad para las plantas. En contraste con este resultado, Fernández et al. (2006), encontraron que el Po de la fracción extraída con NaOH fue el que predominó (89%), con respecto a la fracción Pi (11%), en los suelos Entisol, Alfisol y Vertisol.

En las fracciones de PLL y de PO; se observa en todas las parcelas, que el Pi se encuentra en mayor proporción que el Po. En 41 parcelas la fracción PiLL correspondió a más del 60% del P y, en la fracción de PO el Pi representó más del 75% del P total (Figura 3.11).

La figura 3.12 muestra que al sumar todas las fracciones inorgánicas y todas las orgánicas en cada suelo, 37 de ellos mostraron que el Pi está por encima del 70 % del P total; esto se podría atribuir a los fertilizantes fosfatados que por muchos años fueron incorporados al suelo (Suñer, 2000). Estos resultados son parecidos a los de Fernández y Turrión (2011), quienes encontraron que el Pi alcanzó el 64,5 % con respecto al P total en un suelo Ultisol de Lara y 82,5 % en el Alfisol de Yaritagua. Hernández y Bautis (2005) señalaron que en suelos de sabanas el Pi fue de 74,2 % y en suelos con pinares de 68,4 %. Cross y Schlesinger (1995), indicaron que el 85,5 % del P total correspondía a Pi en un suelo Vertisol.

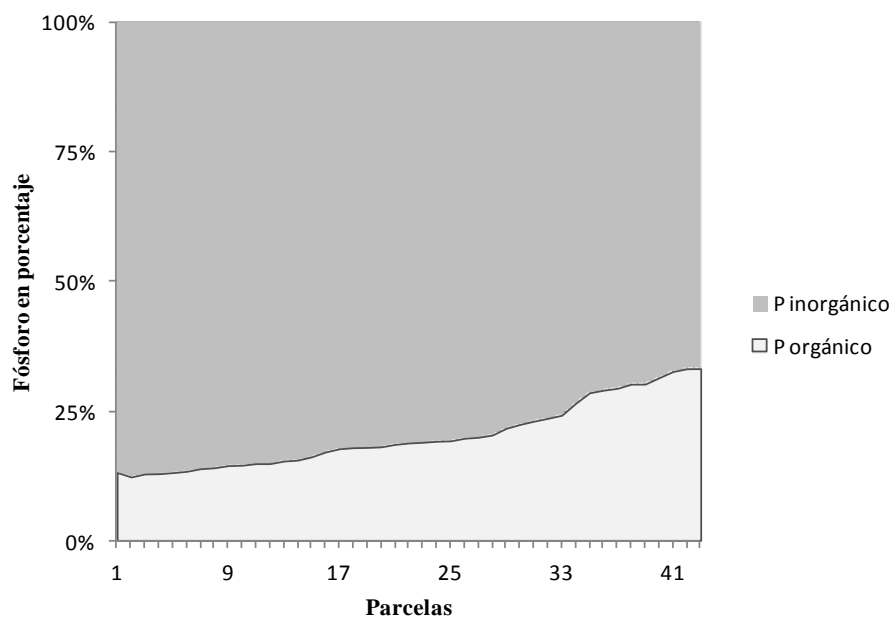


Figura 3.12: Distribución del Pi total y del Po total en los suelos evaluados

En los suelos bajo cultivo de arroz del Sistema de Riego del Río Guárico el Po varió entre 13 y 33 % del P total, lo que representa una proporción pequeña con respecto al total, y este dato se corresponde con lo presentado por Turner, (2006) en una serie de suelos de Madagascar, en donde el Po varió entre 7 % y 29 %.

Las fertilizaciones fosfatadas continuas por largos períodos de tiempo podrían haber ocasionado que predominen las formas de Pi sobre las formas de Po en el suelo, lo cual fue encontrado por Carneiro et al. (2011), en un Oxisol bajo diferentes usos agrícolas. Takahashi y Anwar (2007), mostraron que la aplicación de fertilizantes fosfatados por 23 años en un suelo Andosol, resultó en una acumulación de grandes cantidades de Pi total a la profundidad 0-15 cm.

Boschetti et al. (2003) mostraron que en los suelos con mayor grado de evolución, hubo una alta proporción de fósforo no reactivo (PiO, PoO y PRC), siendo entre un 50 y 70% del P total.

En la figura 3.13 se muestra el resultado de agrupar las fracciones de P en función de su disponibilidad para las plantas, de acuerdo al criterio de Ochwah et al. (2005): P soluble y lábil (PiR, PiL y PoL), P adsorbido (PiML, PoML, PiLL y PoLL), P ocluido y residual (PiO, PoO y PiRC).

Las fracciones lábiles variaron entre 2,76 % y 16,74 % en los 43 suelos, en la mitad de ellos se encontró que estas formas de P se encontraban por debajo de 6%, se corresponde con lo mostrado por Cross y Schlesinger (1995), en un estudio realizado en 61 suelos y 8 órdenes de suelos. Los datos indicaron que las fracciones de PiR y PiL representaron de 4 a 6 % del P total; por su parte, Boschetti et al. (2003), encontraron que las formas lábiles de P representaron 10 % en suelos moderadamente y altamente evolucionados. El P soluble y lábil fue inferior a 10 % en 86 % de los suelos evaluados (37 parcelas), estas fracciones contienen el P de rápida disponibilidad para la planta

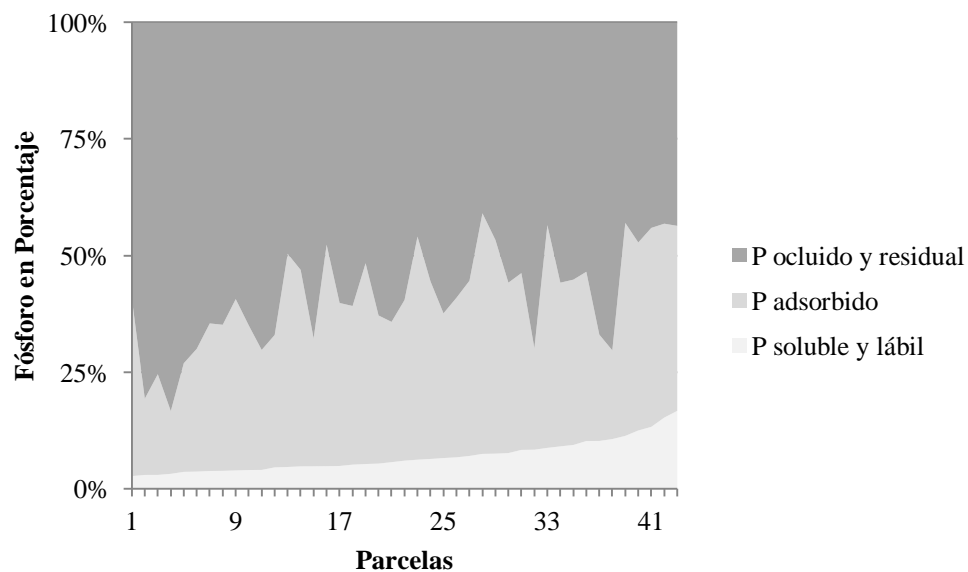


Figura 3.13. Fracciones de fósforo soluble y lábil, adsorbido y P ocluido y residual en 43 suelos del Sistema de Riego del Río Guárico, de acuerdo a la disponibilidad para la planta

El P adsorbido ( $P_{iML}$ ,  $P_{oML}$ ,  $P_{iLL}$  y  $P_{oLL}$ ) corresponde a formas asociadas al Fe, Al y Ca, en los 43 suelos varió entre 13,47 y 51,51 % del P total, en 32 parcelas se encontró que el P adsorbido fue mayor a 30 %, esta formas de P adsorbido no están inmediatamente disponibles para las plantas.

Finalmente, el P ocluido y residual ( $P_{iO}$ ,  $P_{oO}$  y  $P_{iRC}$ ) fue más alto que las dos formas anteriores y varió entre 41 y 81% del P total, en 33 parcelas el P ocluido y residual fue superior al 50%; lo que corresponde al  $P_i$  y  $P_o$  que está fijado en el suelo. Cross y Schlesinger (1995), encontraron que la fracción residual ( $P_{iRC}$ ) representó el 40 % del P total.

Las fracciones de P adsorbido, ocluido y residual conformaron una reserva de P no disponible y representaron más del 88 % del P total en 38 suelos. Cross y Schlesinger (1995), encontraron que el 86 % del P está en fracciones no disponibles, en todos los

órdenes de suelos estudiados, por su parte Boschetti et al. (2003) señalaron que el 60 % del P total esta en forma no disponible.

Sharpley y Smith (1985), encontraron que los cultivos por largos períodos de tiempo (30-50 años) tienen efecto en la distribución relativa del P en las fracciones inorgánicas y orgánicas de 3 suelos no calcáreos. El incremento de la cantidad de  $P_i$  en los suelos, sobretodo de la fracción de P intercambiable ( $0,5 \text{ M NH}_4\text{F} + 0,1 \text{ M NaOH}$ ) fue asociada a la fertilización fosfatada. En el  $P_o$ , la fracción moderadamente lábil ( $1,0 \text{ M H}_2\text{SO}_4 + 0,5 \text{ M NaOH}$ ) y la moderadamente resistente ( $0,5 \text{ M NaOH/HCl}$ ) son las que mostraron el cambio más importante. Finalmente se podría decir que las fracciones  $P_{iML}$ ,  $P_{oML}$  y  $P_{oO}$  se incrementaron en los suelos cultivados por muchos años.

Cross y Schlesinger (1995), encontraron que el P biológicamente activo ( $P_{oL}$ ,  $P_{oML}$ ) incrementó en la medida que el suelo fue más meteorizado, 5 % en Entisoles hasta 35 % en Oxisoles; las fracciones geoquímicas de P ( $P_{iR}$ ,  $P_{iL}$ ,  $P_{iML}$ ,  $P_{iLL}$ ,  $P_{oO}$ ,  $P_{iRC}$ ) disminuyeron con el gradiente de meteorización, de 95 % en Entisoles a 65 % en Oxisoles. La separación en formas biológicas y geoquímicas parece ser más sensible a los cambios en la distribución del P durante el desarrollo de los suelos, que la tradicional separación de formas lábiles y no lábiles.

Turrión et al. (2007), estudiaron el efecto de diferentes coberturas vegetales sobre las formas de P en el suelo, encontrando que las formas inorgánicas fueron influenciadas en mayor grado que las formas orgánicas por el tipo de cubierta vegetal; por lo cual, las formas inorgánicas lábiles ( $P_{iR}$  y  $P_{iL}$ ) podrían ser utilizados como indicadores de la calidad del suelo, debido a su sensibilidad a la cubierta vegetal y a su fácil determinación.

Los suelos arroceros son en general preparados mediante batidos y los restos de cosecha incorporados al suelo, estos restos de cosechas son mineralizados y se esperaría que pasaran a formar parte de las fracciones orgánicas moderadamente lábiles.

### 3.3.5 Relaciones entre las fracciones de Pi y las variables de suelo.

Cuadro 3.5: Correlaciones para  $p \leq 0,05$  de las fracciones de Pi con el Al, pH, Arcilla, materia orgánica, Zn, Capacidad de intercambio y Ca de los suelos

	Al	pH	Arcilla	MO	Zn	CIC	Ca
<b>PiML</b>	-	-	0,40	0,49	0,55	0,44	0,43
<b>PiLL</b>	-	0,32	0,40	0,46	0,50	0,50	0,49
<b>PiO</b>	-0,37	0,51	0,77	0,60	0,48	0,69	0,65
<b>PiRC</b>	-0,44	0,42	0,89	0,77	0,66	0,86	0,85

Se encontraron correlaciones negativas pero bajas entre el aluminio intercambiable y las fracciones PiO y PiRC (Cuadro 3.5). Este comportamiento puede explicarse porque en presencia de Al, en el suelo, se forman fosfatos de aluminio ocluido en óxidos de hierro (III), lo que hace que sean muy poco aprovechables por las plantas, la extracción de estos fosfatos se hace mediante la digestión ácida (López, 1977). Para evaluar en qué medida las fracciones de PiO y PiRC pueden ser explicadas con Al intercambiable se calcularon las regresiones correspondientes y se encontró que los valores de coeficientes de determinación fueron inferiores al 20%; indicando que no se puede predecir los valores de PiO y PiRC en función del Al en el suelo.

Las fracciones de PiLL, PiO y PiRC mostraron correlaciones positivas con el pH (Cuadro 3.5); sin embargo, el coeficiente de correlación entre PiLL y pH fue bajo (0,32) aunque significativo, los otros dos coeficientes fueron más altos indicando una mayor relación entre el pH del suelo con las formas de PiO y PiRC. El comportamiento de estas fracciones se podría explicar porque con el incremento del pH aumenta el contenido de grupos  $\text{OH}^-$  y se forman complejos poco solubles de fosfatos de calcio ocluidos en carbonatos (López, 1977). El coeficiente de determinación es mayor entre PiO y el pH, lo que indica que hay mayor asociación entre estas variables. Se realizó el gráfico de regresión y se obtuvo un

coeficiente de determinación ( $R^2$ ) inferior al 25%; lo que indica que la variación del P en las fracciones PiLL, PiO, PiRC no puede ser explicada por el pH.

El contenido de arcilla correlacionó positivamente con las fracciones de PiML, PiLL, PiO y PiRC, el coeficiente de correlación fue mayor entre arcilla y las formas PiO y PiRC; 0,77 y 0,89 respectivamente, lo que denota una estrecha relación entre las dos formas de Pi con el contenido de arcilla, por lo cual se esperaría que al haber mayor cantidad de arcilla mayor sería el Pi fijado en los suelos. En suelos moderadamente ácidos los fosfatos pueden ser adsorbidos por las arcillas silíceas mediante reemplazo de aniones  $\text{OH}^-$  por aniones fosfatos o por intermedio de cationes  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{2+}$ , que hacen puente de unión entre la arcilla y el anión fosfato (Fuentes, 1999). Al haber mayor contenido de arcilla habrá mayor área superficial para adsorber a los fosfatos, en algunos casos esta energía puede ser tan alta que el P sólo puede ser extraído con ácidos fuertes.

Para evaluar la dependencia de las fracciones PiML, PiLL, PiO y PiRC con el contenido de arcilla, se calcularon las regresiones respectivas. Los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de 0,16 indicaron que la variación del P en las fracciones PiML y PiLL no puede ser explicada por la arcilla. Las regresiones entre las fracciones PiO y PiRC con el contenido de arcilla se muestran en la figura 3.14.

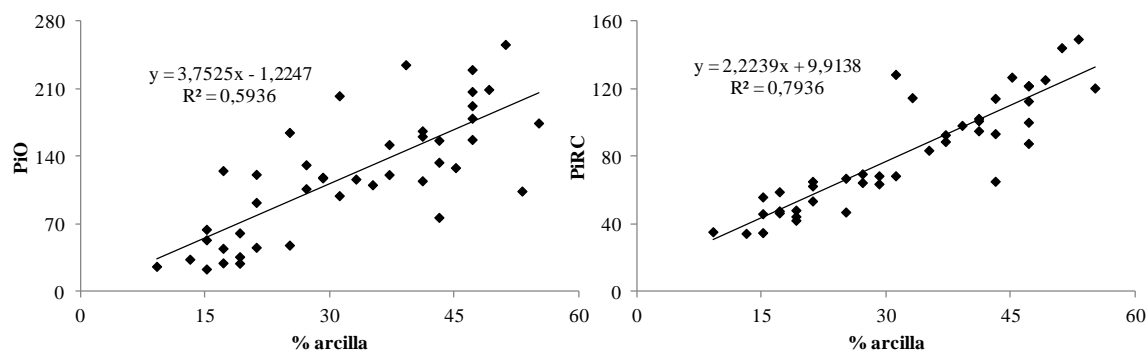


Figura 3.14 Regresiones lineales entre: (A) PiO y % arcilla y (B) PiRC y % arcilla

Los valores del coeficiente de determinación indicaron que el 59 % de la variación del PiO puede ser explicado por el contenido de arcilla y que el 79 % de variación de PiRC puede atribuirse a la variación del contenido de arcilla (Figura 3.14). Este comportamiento revela que en los suelos con mayor contenido de arcilla puede tener lugar una mayor retención de fosfatos, con una energía tan grande que sólo pueden desorberse mediante el uso ácidos fuertes.

El contenido de materia orgánica correlacionó positivamente con las fracciones de Pi, en particular con las formas no lábiles PiO y PRC (0,60 y 0,77), lo que indica que hay mayor asociación entre la MO y las formas no lábiles. De acuerdo con López (1977) los cationes de metales pesados como hierro y aluminio forman quelatos con la materia orgánica bien humificada, estos últimos complejos se cree que juegan un papel muy importante en la retención de fosfatos en suelos; por eso se asocia la materia orgánica a estas fracciones que son poco lábiles y a fracciones recalcitrantes.

Se realizaron los gráficos de regresión y las ecuaciones mostraron que el comportamiento de las fracciones de PiML, PiLL y PiO no pueden ser explicados por la variación de la MO; los coeficientes estuvieron por debajo de 0,36; sin embargo, se encontró que el coeficiente de determinación de la regresión calculada para PiRC y MO fue de 0,59 (Figura 3.15) el cual puede explicar 59% de la variación del PiRC, que puede ser atribuida al efecto de la materia orgánica bien humificada, es decir que se relaciona linealmente con los fosfatos recalcitrantes. Lo que podría estar ocurriendo es que se ha formado una fuerte interacción entre los fosfatos y los compuestos órgano-metálicos presentes en el suelo (López, 1977), mediante formación de complejos menores, en donde el ion ortofosfato se enlaza al ácido fúlvico a través de Fe o Al; y en los complejos mayores, el P se presenta como metal-fosfato mezclado físicamente con la interacción ácido fúlvico metal-fosfato (Levesque y Schnitzer, 1967).



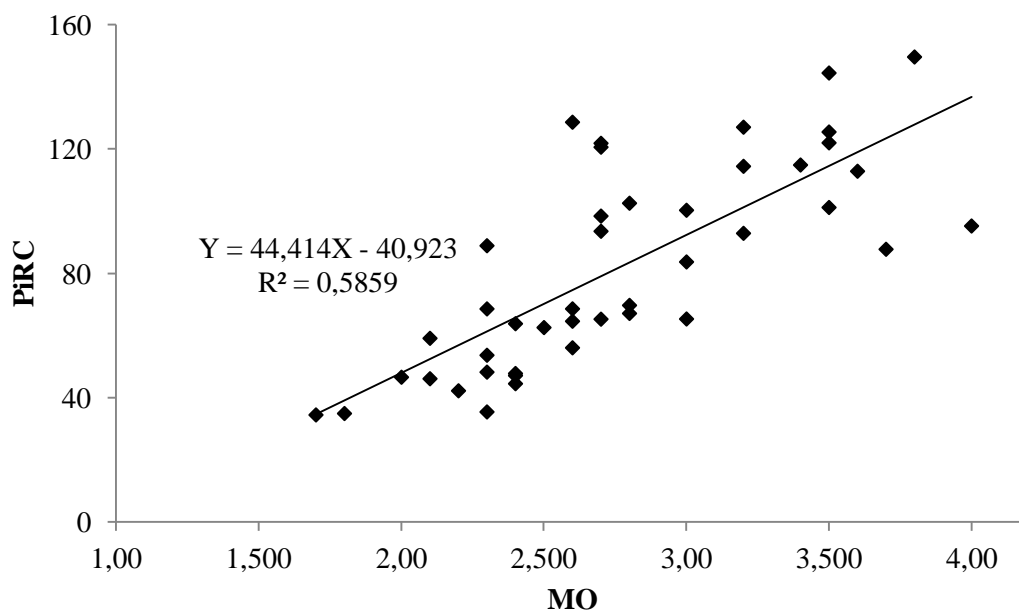


Figura 3.15 Regresiones lineales entre el PiRC y la MO

El zinc correlacionó positivamente con las fracciones PiML, PiLL, PiO y PiRC, el coeficiente más alto fue entre PiRC y Zn, lo que indica una mayor asociación entre estas variables; esto se puede explicar por las condiciones de reducción de los suelos. En presencia de excesos de fertilizantes fosfatados se pueden formar fosfatos de zinc insolubles (Fuente, 1999). Los fosfatos de zinc insolubles son solubilizados con extractantes más fuertes y por eso el Zn correlacionó con las fracciones de Pi no lábiles, de poco acceso para la planta. Para evaluar la dependencia entre las fracciones de PiML, PiLL, PiO, PiRC y el contenido de Zn se calcularon las respectivas regresiones; los coeficientes de determinación presentaron valores muy bajos para las fracciones lábiles y PiO, (inferior a 0,3). Para el caso de PiRC ( $Y = 24,31X + 27,14$   $R^2 = 0,44$ ), el coeficiente de determinación de la regresión permitió explicar que 44 % de la variación del PiRC depende del Zn en el suelo.

La CIC y el contenido de calcio correlacionaron positivamente con las fracciones de PiML, PiLL, PiO, PiRC; los coeficientes de correlación (Cuadro 3.5) fueron parecidos para las dos variables de suelo, en el caso de las fracciones lábiles estos coeficientes variaron entre 0,43 y 0,50, para el PiO fue de 0,69 y 0,65, los coeficientes para la forma PiRC fueron notablemente más altos 0,86 y 0,85. Estos comportamientos indican que el grado de asociación de las formas lábiles con la CIC y el Ca fue menor que con las formas no lábiles y que, además, la forma PiRC está más ligada a la CIC y al Ca que las otras tres formas.

El calcio es uno de elementos que más abunda en el complejo de intercambio, además bajo condiciones de reducción el aluminio no está activo (Casanova, 2005; Fuentes, 1999), por eso el Ca y la CIC se correlacionan muy bien con las fracciones de Pi antes mencionada. Al haber mayor CIC, mayor será la probabilidad que los cationes del complejo reaccionen con los fosfatos, produciendo compuestos poco solubles. El calcio forma compuestos insolubles como los fosfatos dicálcico, la hidroxiapatita o la oxi-apatita, entre otros compuestos (Bravo, 2000).

Las ecuaciones de regresión mostraron que el comportamiento de las fracciones de PiML, PiLL no pueden ser explicadas por la variación del contenido de Ca; ya que los coeficientes de determinación estuvieron por debajo de 0,24.

La regresión lineal para PiO y Ca resultó con un coeficiente de determinación de 0,42 ( $Y = 0,06X + 52,84$   $R^2 = 0,42$ ), en cambio en la regresión lineal entre PiRC y Ca fue más alto de 0,73 (Figura 3.16). Estos coeficientes permiten ver que el 42% de la variación de del PiO y el 73% del PiRC pueden ser explicados por las variaciones de Ca en el suelo y que, además, la forma de Pi recalcitrante es más dependiente del calcio en el suelo que la forma de Pi ocluida.

Lo anterior es una indicación de que efectivamente los fosfatos provenientes de las fertilizaciones han reaccionando con el calcio formando compuestos recalcitrantes, de los cuales sólo se puede liberar el P mediante reacciones de oxidación muy fuertes.

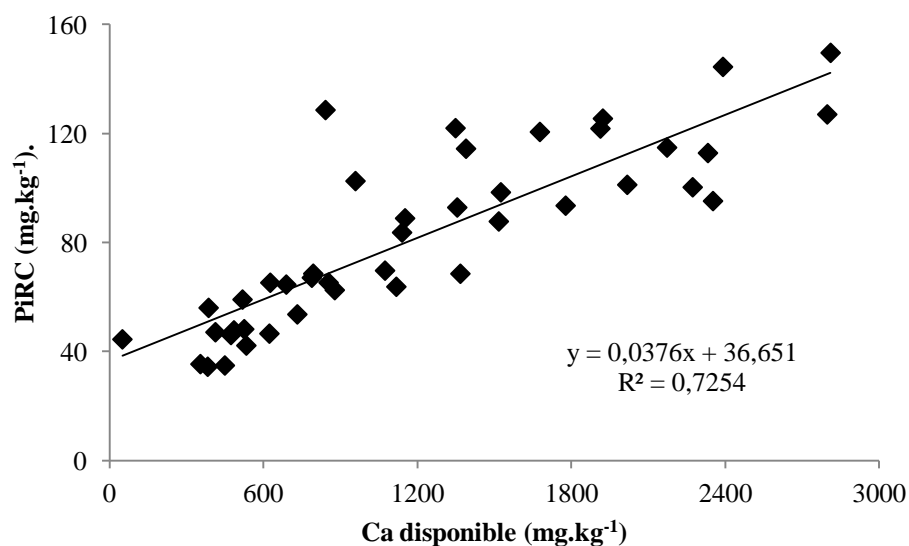


Figura 3.16. Relación entre fracción de PiRC y el Ca disponible en el suelo

### 3.3.6 Relaciones entre las fracciones de Po y las variables de suelos.

En el cuadro 3.6 se observa que las fracciones extraídas con HCl 1 M (PoLL) y HCl concentrado (PoO) mostraron correlación positiva con el pH, esto se podría explicar porque al aumentar el pH aumenta el contenido de grupos  $\text{OH}^-$  y éstos forman compuestos pocos solubles, que en general contendrán calcio y el HCl extrae formas de P asociadas al calcio (Tiessen y Moir 1993, Hedley et al., 1882). El contenido de materia orgánica se correlacionó positivamente con las fracciones PoML y PoLL, se explica porque los restos de cosechas son incorporados al suelo y éstos se mineralizan en el mediano o largo plazo, el P presente pasa a formar parte del suelo en fracciones poco lábiles. El contenido de calcio se correlacionó positivamente con las fracciones de PoLL y PoO; al haber mayor contenido de calcio en solución los hexafosfatos de inositol puede formar sales con el Ca (López, 1977), los cuales quedan adheridos a las partículas del suelo y pueden liberarse por la acción del HCl que disuelve los fosfatos de calcio.

Cuadro 3.6: Correlaciones para  $p \leq 0,05$  entre las fracciones de PoML, PoLL, PoO con el pH, materia orgánica, Zn, capacidad de intercambio y Ca de los suelos

	pH	MO	Zn	CIC	Ca
PoML	-	0,46	-	-	-
PoLL	0,40	0,33	-	0,48	0,41
PoO	0,33	-	0,44	0,38	0,37

Es importante resaltar que todos los coeficientes de correlación son menores a 0,5; esto quiere decir que existe poca asociación entre las variables.

El aluminio, zinc, el contenido de arcilla y los años de fertilización no se correlacionaron con ninguna de las fracciones de Po extraídas.

### 3.4. Fósforo disponible en los suelos evaluados.

El fósforo disponible en los suelos se evaluó por diferentes métodos (Cuadro 3.7). En el país el más usado es Olsen para suelos ácidos y alcalinos y Bray I para suelos ácidos.

Cuadro 3.7: Fósforo disponible en suelo con los distintos métodos evaluados

Muestra	Métodos de fósforo disponible ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )				Años*
	Olsen	Bray I	Mehlich III	Agua	
sue-01	18	14	9	0,10	13
sue-02	9	26	14	0,15	-
sue-03	1	4	4	0,09	16.5
sue-04	13	2	3	0,05	32
sue-05	6	4	7	0,19	40

Muestra	Métodos de fósforo disponible (mg.kg <sup>-1</sup> )				Años*
	Olsen	Bray I	Mehlich III	Agua	
sue-06	10	4	5	0,25	20
sue-07	4	3	5	0,16	50
sue-08	5	2	4	0,08	9
sue-09	9	2	3	0,04	45
sue-10	6	4	5	0,05	10
sue-11	7	5	6	0,21	40
sue-13	1	2	1	0,08	10
sue-14	23	9	16	1,00	30
sue-16	3	2	2	0,20	5
sue-17	1	1	1	0,16	5
sue-18	6	2	4	0,16	30
sue-19	4	2	2	0,20	20
sue-20	2	3	3	0,14	-
sue-21	3	4	3	0,06	40
sue-22	3	3	4	0,10	48
sue-23	6	2	2	0,04	50
sue-24	5	15	9	0,12	25
sue-26	5	7	7	0,09	40
sue-27	2	7	5	0,09	30
sue-28	5	3	3	0,05	40
sue-29	5	2	4	0,04	35
sue-30	22	19	15	0,33	45
sue-31	3	6	7	0,11	5
sue-33	8	8	7	0,13	51
sue-34	7	11	11	0,09	30
sue-35	16	20	16	0,24	30

Muestra	Métodos de fósforo disponible (mg.kg <sup>-1</sup> )				Años*
	Olsen	Bray I	Mehlich III	Agua	
sue-36	5	2	4	0,09	40
sue-37	14	3	8	0,51	10
sue-38	17	2	4	0,18	15
sue-40	2	3	4	0,09	18
sue-41	5	2	4	0,03	30
sue-43	8	10	10	0,17	40
sue-44	8	4	4	0,03	-
sue-45	20	16	20	0,33	-
sue-46	3	8	6	0,07	-
sue-47	9	12	12	0,18	-
sue-48	21	6	11	0,78	-
sue-49	2	5	4	0,03	30
<b>Promedio</b>	<b>7,72</b>	<b>6,30</b>	<b>6,48</b>	<b>0,17</b>	-
<b>SD</b>	<b>6,12</b>	<b>5,77</b>	<b>4,51</b>	<b>0,19</b>	-
<b>Máximo</b>	<b>23,00</b>	<b>26,00</b>	<b>20,30</b>	<b>1,00</b>	-
<b>Mínimo</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,20</b>	<b>0,03</b>	-
<b>C.V.</b>	<b>79,3</b>	<b>91,6</b>	<b>69,6</b>	<b>110,9</b>	-

\*Años de fertilización

El fósforo soluble en agua (solución del suelo) varió entre 0,03 y 1,00 mg.kg<sup>-1</sup> con un valor promedio de 0,17 mg.kg<sup>-1</sup>; el P disponible por Olsen mostró un promedio de 7,2 mg.kg<sup>-1</sup> con un rango de 1 a 23 mg kg<sup>-1</sup>. De acuerdo con Ramírez et al. (1989, 1990) los niveles de P disponible por Olsen por debajo de 5 mg.kg<sup>-1</sup> son considerado muy bajo, por debajo de 12 mg.kg<sup>-1</sup> son considerados bajos, por consiguiente 35 de los suelos estudiados son deficientes en P, sólo 5 suelos son de contenido medio, entre 14 y 20 mg.kg<sup>-1</sup> y 3 altos con más de 20 mg.kg<sup>-1</sup> P disponible (Figura 3.17).

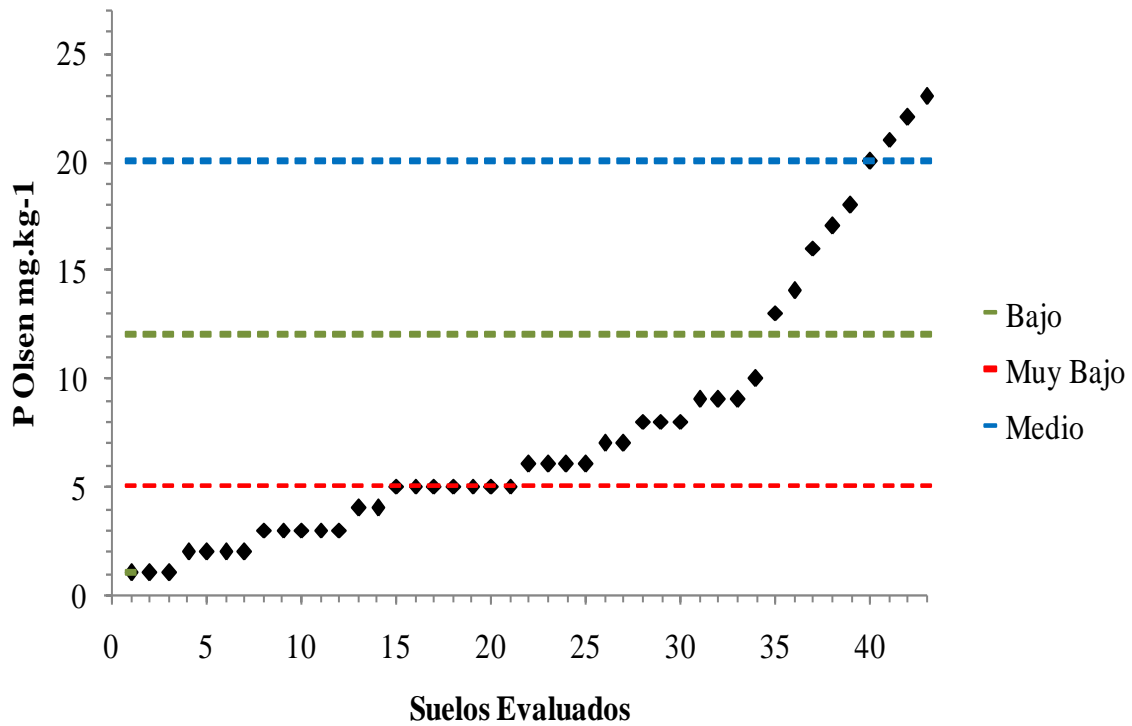


Figura 3.17 Distribución de los niveles de disponibilidad de P Olsen

El método Bray I extrajo entre 1 y 26 mg.kg<sup>-1</sup> con una media de 6,3 mg.kg<sup>-1</sup>. Los niveles de suficiencia de P para Bray I, estimado por lo publicado por Ramírez et al. (1989) serían, en mg.kg<sup>-1</sup>, de 0 a 2 muy bajo, por debajo de 6 es bajo, de 6 a 10 para medio, de 10 a 15 para alto, superior a 15 muy alto. De acuerdo con este criterio 29 suelos estudiados son deficientes en P, 6 medianos, 4 alto y 4 muy altos (Figura 3.18). Estos resultados demuestran que ambos métodos, Olsen y Bray I, son igualmente capaces de estimar el P disponible en los suelos bajo cultivo de arroz en el Sistema de Riego del Río Guárico. Por otra parte, es evidente que los suelos muestreados son deficientes en P disponible para la planta y que requieren de la aplicación de fertilizantes fosfatados de acuerdo al cultivar que se siembre y al sistema de manejo de los suelos y del cultivo.

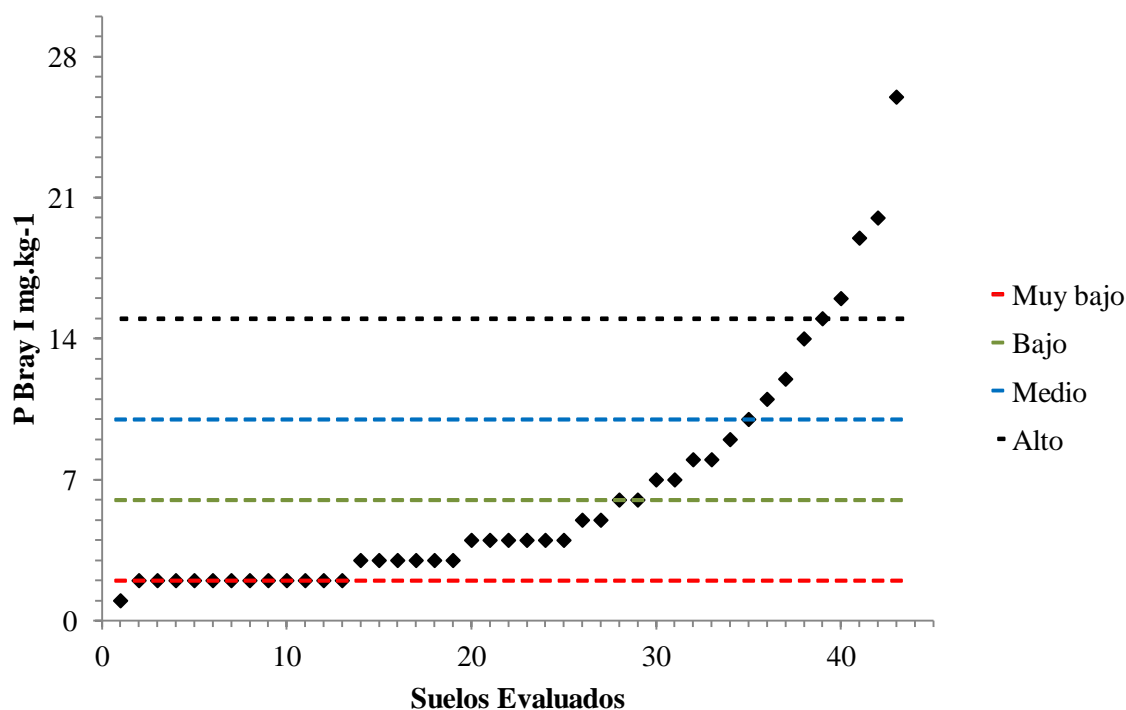


Figura 3.18 Distribución de los niveles de disponibilidad de P Bray I

El P disponible es evaluado en la mayoría de las sedes de los laboratorios del INIA por el método Olsen, sólo en INIA Anzoátegui es usado el método Bray I, con fines de fertilidad en los análisis de rutina (Gilabert et al., 1990).

El promedio de P extraído con Mehlich III fue de 6,40 mg.kg<sup>-1</sup> con un rango entre 1 y 20 mg.kg<sup>-1</sup> estos valores son parecidos a los encontrados con Olsen y Bray I. No se cuenta con información sobre rangos de suficiencia de P en el suelo para Mehlich III.

El método Melinch III es usado a nivel mundial para determinaciones de P, porque tiene la ventaja que puede usarse para las determinaciones de multielementos. En muchos casos se interpretan los criterios de disponibilidad de P con el método de Bray I (Wang et al., 2004), debido a que ambas soluciones extractoras son ácidas y contiene fluoruro de amonio; sin embargo, en Venezuela no se usa en análisis de rutina, por eso se usó en este trabajo para



hacer las comparaciones respectivas; encontrándose que en promedio es ligeramente superior a P Bray I.

Cabalceta y Cordero (1994), establecieron los niveles crítico de P disponible en suelos con cuatro órdenes distintos y con diferentes cultivos en Costa Rica, encontrándose que en Vertisoles cultivados con arroz el nivel crítico fue de 10 mg.kg<sup>-1</sup> para el método de Olsen, 11 mg.kg<sup>-1</sup> para Bray I y 13 mg.kg<sup>-1</sup> para Mehlich III.

Fageira y Santos (2008), determinaron los niveles de P luego de cultivar arroz por 2 años en un Inceptisol de Brasil y clasificaron los niveles de P de acuerdo a distintos métodos, según Bray I entre 0 y 17 mg.kg<sup>-1</sup> fue muy bajo, entre 17 y 28 mg.kg<sup>-1</sup> bajo, entre 28 y 35 mg.kg<sup>-1</sup> medio y mayor a 35 mg.kg<sup>-1</sup> alto.

En Venezuela no existen valores críticos de P para el cultivo de arroz, los valores de fósforo disponible determinados corresponden a suelos de baja disponibilidad de fósforo (López et al., 2008).

La SD determinada para cada método indica que hubo gran dispersión de los datos con respecto al valor promedio. Los CV también resultaron muy altos, los datos de P soluble en agua fueron los que presentaron mayor dispersión (111%), asociado a la gran heterogeneidad que hay entre las parcelas.

Para medir si el contenido de P determinado en cada método estaba contenido en una curva de distribución normal para un nivel de confianza de 68 % (media  $\pm$  1SD), se calculó el porcentaje de datos que estuvieron contenidos debajo de esa área. En el método de Olsen el 74,4 % de datos están entre el promedio  $\pm$  1SD; para el método de Bray I el 86 % de datos están entre el promedio  $\pm$  1SD; para el método de Mehlich III el 79,1 % de datos están entre el promedio  $\pm$  1SD; para el P soluble en agua, el 93 % de los datos están entre el promedio  $\pm$  1SD; lo cual indica que los datos adoptan una distribución normal estrecha, ya que más del 70 % de los datos está dentro del 68 % de la curva normal (Spiegel, 1991).

### 3.4.1. Relaciones entre los distintos métodos de P disponible

Los coeficientes de correlación entre P soluble en agua, P Olsen, P Bray I y P Mehlich III se muestran en el cuadro 3.8, observándose correlación entre los distintos métodos de extracción de fósforo para un 95 % de confianza. Los coeficientes de correlación más altos se produjeron entre Olsen y Mehlich III, se espera mayor asociación entre estas variables, aunque los extractantes son de naturaleza distinta.

Cuadro 3.8: Coeficientes de correlación ( $p \leq 0,05$ ) entre los distintos métodos de extracción de fósforo disponible en el suelo.

	POlsen	PBray I	PMehlich III
PBray I	0,48		
PMehlich III	0,72	0,85	
Pagua	0,69	0,20	0,55

El método de Bray I mostró mayor coeficiente de correlación con Mehlich III, asociado a que ambos extractantes son ácidos y contienen fluoruro, por lo cual se espera que actúen sobre fracciones similares de P disponible. Mehlich III mostró mayor coeficiente de correlación con Bray I, lo que se espera, las dos soluciones intervienen sobre los fosfatos de Fe y Al. El P soluble en agua mostró mayor coeficiente de correlación con el Olsen.

La solución extractante en Olsen contiene el ion bicarbonato, el cual sufre una reacción de hidrólisis, produciendo  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{OH}^-$ ; el carbonato disminuye el contenido de Ca en la solución del suelo precipitándolo como  $\text{CaCO}_3$ , evitando la formación de  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , y también se forman oxi-hidróxidos de Fe y Al que son poco solubles, incrementando la solubilidad del P. En la solución extractora de Bray I y en Mehlich III el fluoruro presente forma complejos con el Al, dejando el P asociado al Al libre para su determinación; además el ácido acético presente en Mehlich III también contribuye a la liberación del P en los

suelos. Al pH que tiene el suelo bajo condiciones de inundación hay poca cantidad de Ca, Fe y Al en solución que pudieran precipitar o acomplejar el P; por lo cual los diferentes extractantes actúan sobre pools de P similares.

El método de Olsen fue el que extrajo mayor cantidad de fósforo; sin embargo, esto no significa que éste sea el mejor método para la determinación de P disponible en este tipo de suelo; ya que la eficiencia de un extractante se considera al correlacionar los valores extraídos en la solución con la materia seca y/o contenido en la planta.

Ramírez et al. (1989) encontraron en los suelos arenosos de la Mesa de Guanipa cultivados con maní, que los métodos de Bray 1, Mehlich 1 y Olsen mostraron coeficientes de correlación muy parecidos. Ramírez y Morales (1989) mostraron que en suelos de pH mayor a 7 de la región norte del Zulia, con tomate bajo riego, el método de Olsen fue el más eficiente.

Cabalceta (1995), en suelos de Costa Rica, encontró excelentes correlaciones entre los métodos de Mehlich III, Mehlich I, Bray I y Olsen modificado, manifestando que pueden ser utilizados en suelos de diferentes órdenes.

Sotomayor et al. (2004) mostraron buenas correlaciones entre los métodos de P disponible por Olsen, Bray I y Mehlich III, en suelos con 4 órdenes de Puerto Rico y Florida.

Debido a que el coeficiente de correlación fue alto entre el P soluble en agua y el P disponible por el método de Olsen y Mehlich III, se realizaron las regresiones lineales correspondientes para medir el grado de dependencia entre las variables y se encontró que la relación con respecto a Olsen fue:  $Y = 0,0212X + 0,0063$ .  $R^2 = 0,47$ , lo que significa que la cantidad de P soluble en agua puede ser explicada en un 47 % por la variación del P Olsen. Entre P soluble en agua y Mehlich III no se encontró dependencia, explicado por el bajo coeficiente de regresión ( $R^2 = 0,30$ ).

También se evaluó el grado de dependencia entre el P Olsen con respecto al P Bray I y se encontró un bajo coeficiente de regresión ( $R^2 = 0,23$ ); lo que indica que no es posible relacionar linealmente al P Olsen con el P Bray I.

La correlación entre el P extraído por las diferentes soluciones extractoras se puede usar para comparar el comportamiento de una solución respecto a otra. La importancia y utilidad de asociar soluciones entre sí, radica en que los resultados obtenidos mediante una metodología pueden ser transformados en otra y, por lo tanto, posibilitar una mejor interpretación (Cabalceta, 1995).

Los coeficientes de correlación más altos se obtuvieron P Olsen y P Mehlich III, también entre P Bray I y el P Mehlich III; por lo cual se realizaron los gráficos de regresión lineal que se muestran en la figura 3.19.

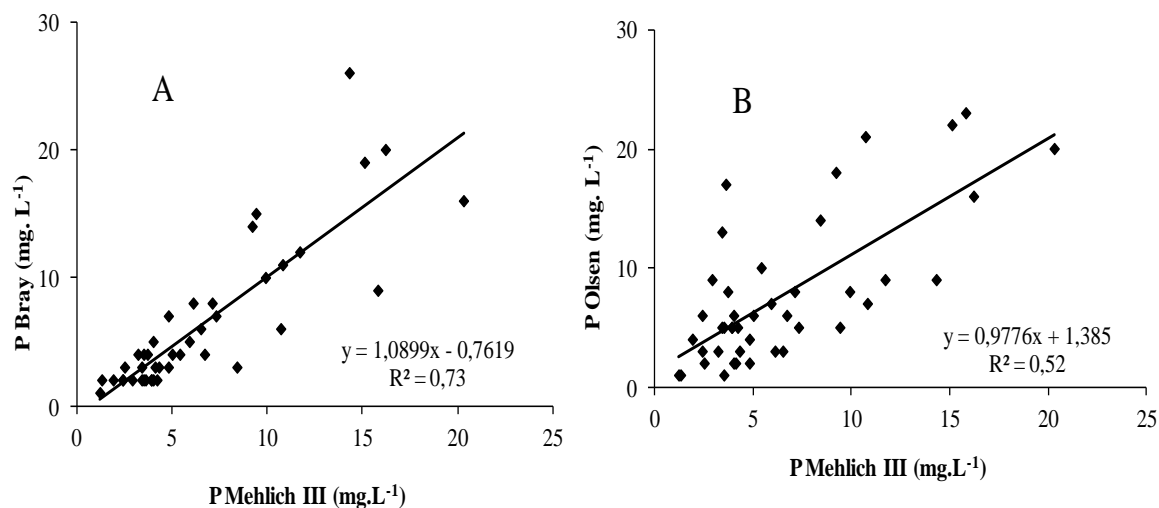


Figura 3.19: Regresiones lineales entre: (A) P Bray I y P Mehlich III y (B) P Olsen y P Mehlich III

Los valores del coeficiente de determinación mostrados en la figura 3.19, indican que el contenido de P Bray I puede ser explicado en un 73 % por la variación del P Mehlich III y que el contenido de P Olsen puede ser explicado en un 52 % por la variación del P Mehlich III. Como el coeficiente de determinación mide el grado de dependencia lineal entre dos variables y fue mayor entre P Bray I y P Mehlich III, se podrían hacer predicciones del P Bray I a partir del P Mehlich III. Esto se podría explicar debido a que ambas soluciones son ácidas y contienen  $\text{NH}_4\text{F}$  el cual actúa sobre el mismo tipo de fosfatos.

El fósforo disponible por Olsen, Bray I, Mehlich III y el soluble en agua no se correlacionaron con los años de fertilización fosfatada, encontrándose que no hay asociación entre estas variables. Se podría pensar que la fertilización continua por muchos años no impactó el contenido de P disponible en los suelos arroceros del sistema de riego del Río Guárico; sin embargo, lo que pudo ocurrir fue que el P provisto por el fertilizante quedó inmovilizado en algunas de las fracciones del suelo o se perdió por el manejo.

El hecho de que los valores de P disponible sean similares entre P Olsen, P Bray I y P Mehlich III podría indicar que las tres soluciones están actuando sobre el mismo tipo de fosfatos; por lo cual pudieran usarse para estos suelo y cultivo. Es muy importante determinar cuánto hay de P disponible en el suelo para adicionar sólo el P que falte mediante las fertilizaciones y así no añadir más del necesario, evitando el incremento en los insumos y el impacto ambiental que podría ocasionar.

#### **3.4.2. Correlaciones entre P Olsen, P Bray I, P Mehlich III y las variables de suelo**

Para relacionar el P disponible por los distintos métodos (P soluble en agua, P Olsen, P Bray I, P Mehlich III) y las variables de suelos (años de fertilización, pH, MO, CIC, Ca, Zn, contenido de arcilla y Al en el suelo), se calcularon los coeficientes de correlación y sólo las relaciones que son significativas se muestran en el cuadro 3.9.

Cuadro 3. 9: Coeficientes de correlación ( $p \leq 0,05$ ) entre P disponible por Bray I y Mehlich III y pH, arcilla, MO, CIC y calcio.

	<b>pH</b>	<b>Arcilla</b>	<b>MO</b>	<b>CIC</b>	<b>Ca</b>
<b>P Bray I</b>	-0,51	-0,66	-0,50	-0,58	-0,55
<b>P Mehlich III</b>	-0,35	-0,43	-0,39	-0,36	-0,33

En el cuadro 3.9 se observa que el P Bray I y el P Mehlich III se correlacionaron en forma negativa con el calcio, la CIC, porcentaje de arcilla, pH y la materia orgánica; lo cual significa que al haber mayor contenido de calcio habrá menor contenido P disponible, ya que el P se inmovilizaría por la presencia del calcio. El Ca es el catión que más abunda en el complejo de intercambio; por lo cual se esperaría la correlación negativa entre el P disponible y la CIC. Se ha reportado que mientras mayor sea el contenido de arcilla habrá menos P disponible debido a que al haber mayor superficie expuesta, es mayor la cantidad de fijación del P (Tisdale y Nelson, 1991). La correlación del P disponible y el pH se explica, porque a pH menos ácidos menor cantidad de Al y Fe hay en solución y menor será la posibilidad que el HCl y  $\text{NH}_4\text{F}$  complejen al Al y Fe para que el P quede en solución; además cuando el pH aumenta se forman fosfatos de calcio poco solubles. El contenido de materia orgánica presentó una correlación negativa con el Bray I, lo cual se explica porque los microorganismos consumen buena parte del P disponible para poder mineralizar la MO, y al haber mayor cantidad de MO mayor serán los requerimientos de P disponible que tendrán los microorganismos.

El P Mehlich III mostró los menores coeficientes de correlación, lo cual indica que el grado de asociación entre las variables no es tan grande como en el caso de P Bray I. Los mayores coeficientes de correlación se obtuvieron entre P Bray I y arcilla y P Bray I y CIC.

### 3.4.3. Relaciones entre las fracciones de Pi y el P disponible en el suelo

Cuadro 3.10: Coeficientes de correlaciones ( $p \leq 0,05$ ) entre el P soluble en agua, P Olsen, P Bray I, P Mehlich III y las fracciones PiR, PiL, PiML, PiLL, PiO y PiRC

	PiR	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC
Olsen	0,59	0,95	0,86	0,86	-	-
Bray I	-	0,65	-	-	-0,45	-0,56
Mehlich III	0,42	0,83	0,37	0,4	-0,28	-0,32
Agua	0,87	0,63	0,59	0,73	-	-

Los métodos de extracción de fósforo disponible en el suelo han sido desarrollados para estimar el nivel de disponibilidad del fósforo con un alto nivel de exactitud; esto quiere decir, que el fósforo extraído es el que está disponible para la planta en la solución del suelo o en algunas de las formas lábiles. Los coeficientes de correlación calculados (Cuadro 3.10) evidencian este enunciado; sin embargo, hay diferencias entre métodos dependiendo de muchos factores de suelo y cultivo. Los métodos Olsen y Mehlich III correlacionaron con todas las formas P lábiles en el suelo así como el extraído con la resina de intercambio. Sin embargo, es notable que el grado de asociación del método con las formas de P fue mayor para Olsen, particularmente en PiML y PiLL, los coeficientes de correlación fueron el doble de los encontrados para Mehlich III. En el caso de Bray I sólo se encontró correlación con la forma PiL, se podría pensar que en los suelos estudiados éste método evalúa principalmente el P lábil.

El P en la solución del suelos (P en agua) correlacionó con todas las formas lábiles, pero el coeficiente de correlación para PiR fue alto, 0,87, lo que indica que el PiR puede ser un buen estimado del P en la solución del suelo.

Los datos de P Olsen se ajustaron a una regresión lineal con los de Pi lábiles (Figura 3.20), los coeficientes de determinación fueron de 0,47, 0,90, 0,74 y 0,74 para PiR, PiL, PiML y

PiLL, respectivamente. Estos tres últimos coeficientes evidencian una alta dependencia del P Olsen de las fracciones lábiles del suelo, más que del P extraído con resina.

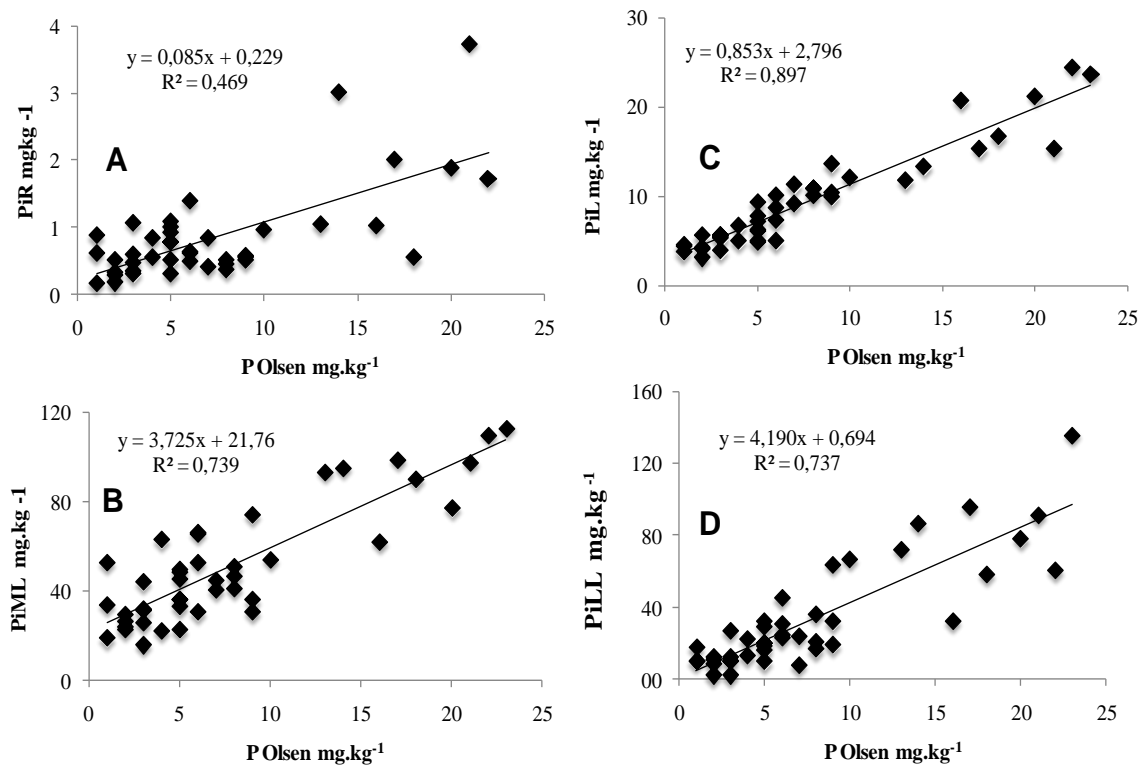


Figura 3.20: Relaciones entre P Olsen y las fracciones de Pi: A: PiR, C: PiL, B: PiML y D: PiLL.

La relación entre el PiR con Olsen, se debe a que el P extraído Olsen contiene parte del PiR. La alta dependencia del PiL con respecto a Olsen se explica porque ambos extractos contienen  $\text{NaHCO}_3$ . La correspondencia de las fracciones PiML y del PiLL con Olsen no es lo esperado, porque Olsen actúa sobre el P disuelto o adsorbido sobre las superficies de carbonatos calcio y óxidos de hierro, en cambio el NaOH disuelve los fosfatos de hierro y de aluminio y el HCl 1M disuelve los fosfatos de calcio; los fosfatos de hierro, aluminio y



calcio, que son fracciones de P no disponibles, en cambio el P extraído por Olsen está disponible para las plantas (Tiessen et al., 1984).

Las regresiones lineales entre las fracciones de PiR, PiML, PiLL, PiO, PiRC y Mehlich III mostraron bajos los coeficientes de determinación, inferiores a 0,2 indicando que no es posible establecer relación entre éstas variables.

Los datos de P Mehlich III sólo se ajustaron al modelo de regresión lineal cuando se usó el PiL (Figura 3.21) con un coeficiente de determinación de 0,75, lo que significa que el 75% de la variación del PiL puede ser atribuido a las variaciones Mehlich III en el suelo, en cambio, en el caso del P Bray I el coeficiente de determinación de la regresión lineal con PiL fue más bajo, 0,52 (Figura 3.22), esto significa un menor ajuste del PiL con el método Bray I.

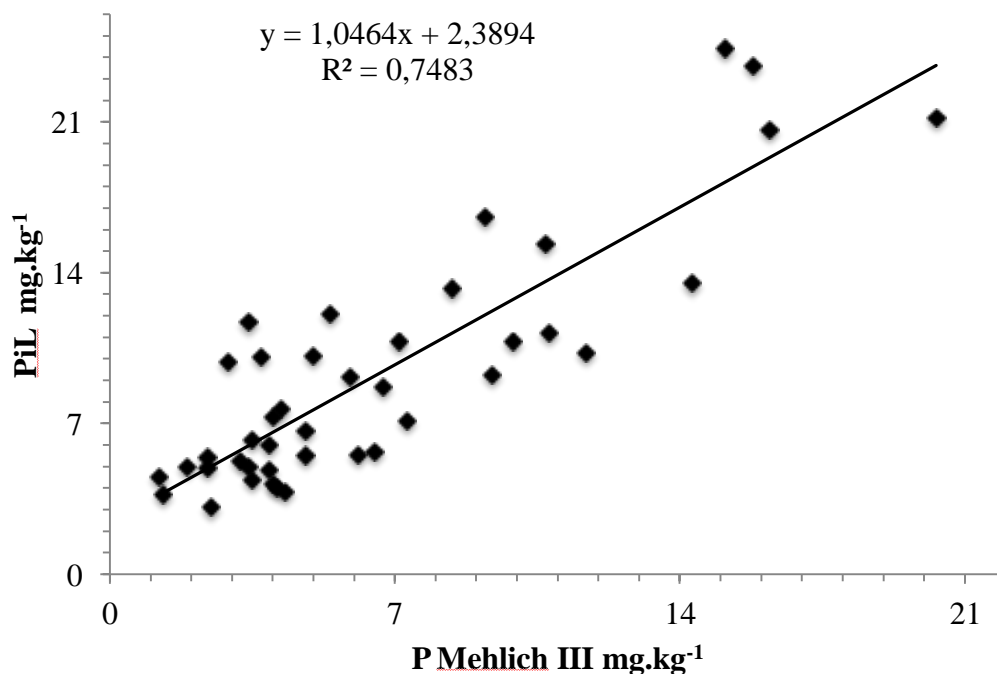


Figura 3.21: Relación entre la fracción de PiL y el P por el método de Mehlich III.

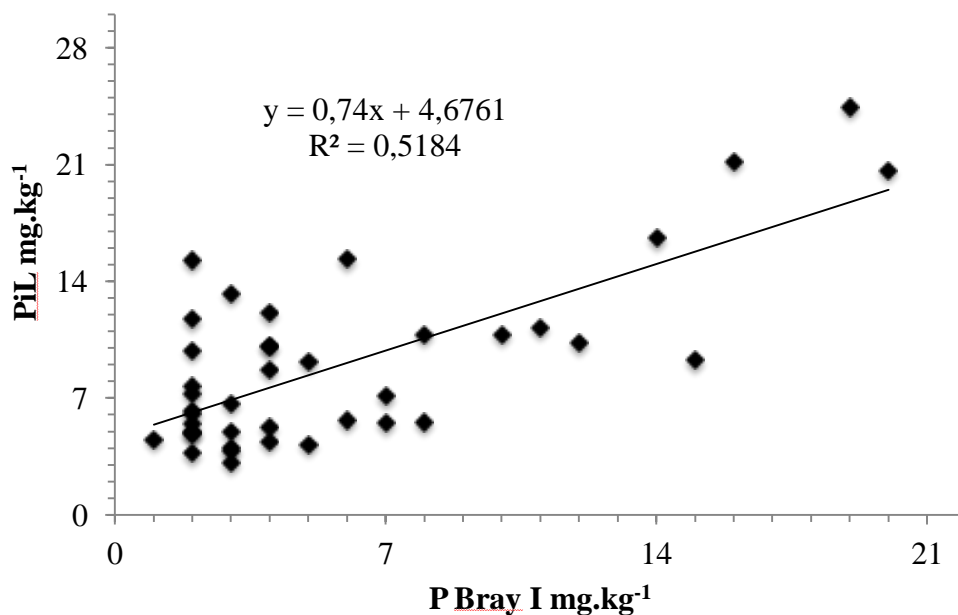


Figura 3.22: Relación entre la fracción de PiL y el P disponible por el método de Bray I.

El bicarbonato extrae una buena parte del P extraído por Bray I, este último extracto es ácido y deja libre el P en los fosfatos de hierro y aluminio; en cambio el bicarbonato se usa para que el P quede en solución y se formen carbonatos de calcio. Aunque la naturaleza de los extractos es diferente, bajo condiciones de inundación el Al, Fe y Ca no están activos; por lo cual, ambos extractos deberían actuar sobre los fosfatos adsorbidos en la superficie de las partículas de suelo.

Se realizaron las regresiones lineales entre las fracción PiO y PiRC con el P Bray I; los valores de los coeficientes de determinación fueron 0,20 y 0,31; respectivamente; por lo cual no es posible relacionar linealmente estas fracciones con el P Bray I.

El ajuste de los datos Pi en agua con el PiR resultó ser una regresión carácter lineal con un valor de  $R^2=0,76$ . Esto quiere decir que la variación en el P de la solución del suelo es altamente dependiente del PiL (Figura 3.23).

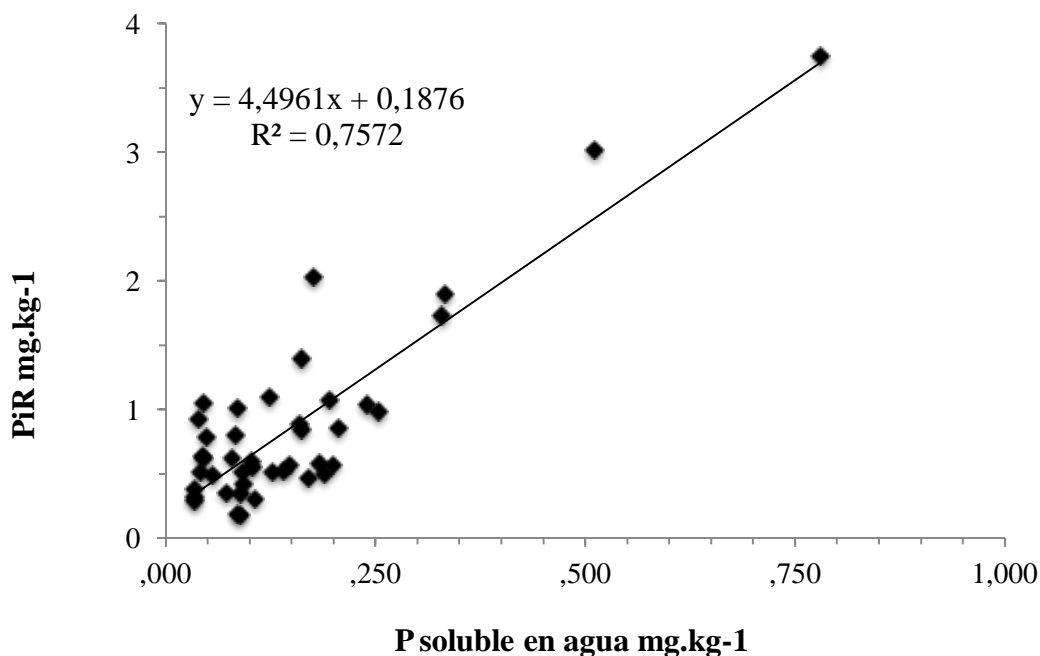


Figura 3.23: Relación entre el PiR y el P soluble en agua

Se midió el grado de dependencia entre las fracciones de PiL, PiML, PiLL y el P soluble en agua, los coeficientes de regresión fueron bajos (menor a 0,25); por lo que no es posible establecer relación lineal entre estas variables.

Se esperaría que la correlación de Olsen, Bray I y Mehlich III fuese sólo con la resina y bicarbonato ya que estos métodos extraen sólo el P disponible; el cual está disponible a corto plazo para las plantas y comunidades microbianas (Cross y Schlesinger, 1995) y que el P soluble en agua correlacionara sólo con el P extraído con la resina, que es el P de inmediata disponibilidad.

Los años de fertilización no se correlacionaron con ninguna de las fracciones de P en el suelo, lo indica que la fertilización continua por tantos años no guarda una asociación con el P presente en el suelo distribuido en las diferentes fracciones.

#### 3.4.4. Relaciones entre las fracciones de Po y el P disponible en el suelo

En el cuadro 3.11 se observó una correlación negativa entre el P Olsen y la fracción PoL, esto no es lo esperado, ya que el extractante de Olsen es bicarbonato, por lo cual la fracción orgánica extraída con bicarbonato debería ser extraída con Olsen. Las fracciones de PoLL y PoO mostraron estar asociadas positivamente con el P Olsen, éste extrae sólo fracciones de P disponible y las fracciones de PoLL y PoO estarían disponibles a largo plazo; sin embargo, es necesario señalar que los coeficientes de correlación son bajos 0,32 a 0,37, lo que indica una asociación no muy estrecha. El P Bray I y el PMehlich III no se correlacionan con ninguna de las fracciones de Po. El P soluble en agua no debió tener asociación con ninguna de las fracciones de Po; sin embargo, se encontró asociación con la fracción PoLL, y no hay explicación posible.

Cuadro 3.11: Coeficientes de correlación ( $p \leq 0,05$ ) entre el P disponible por Olsen, soluble en Agua y las fracciones de PoL, PoLL y PoO

	PoL	PoLL	PoO
<b>P Olsen</b>	-032	0,36	0,37
<b>P Agua</b>	-	0,55	-

#### 3.5. Cadmio en el suelo

La presencia de cadmio en los suelos agrícolas ha generado gran preocupación a nivel mundial, debido al riesgo de ingreso de éste metal tóxico a la cadena alimenticia

(Rothbaum et al., 1986, Smolders et al., 1999, Herrera, 2000, Bonomelli et al., 2003, Al-Faiyz et al., 2007).

El contenido de cadmio en los suelos estudiados estuvo entre 0,012 y 0,318 mg.kg<sup>-1</sup>, con un valor promedio de 0,073 mg.kg<sup>-1</sup> (Cuadro 3.12). El valor crítico de Cd para los suelos agrícolas sugerido por Kabata-Pendías y Pendías, (1984) es de 0,5 mg kg<sup>-1</sup>. En la figura 3.24 se observa que los suelos arroceros del Sistema de Riego del Río Guárico no tienen problemas de contaminación con este metal, ya que todos los valores están muy por debajo del valor crítico.

Cuadro 3.12 Valores promedio de cadmio disponible en el suelo (mg.kg<sup>-1</sup>).

<b>Muestra</b>	<b>Cd</b>	<b>Muestra</b>	<b>Cd</b>	<b>Muestra</b>	<b>Cd</b>
sue-01	0,039	sue-17	0,066	sue-33	0,031
sue-02	0,025	sue-18	0,083	sue-34	0,040
sue-03	0,029	sue-19	0,077	sue-35	0,028
sue-04	0,086	sue-20	0,062	sue-36	0,106
sue-05	0,082	sue-21	0,021	sue-37	0,125
sue-06	0,078	sue-22	0,030	sue-38	0,115
sue-07	0,065	sue-23	0,091	sue-40	0,015
sue-08	0,060	sue-24	0,160	sue-41	0,045
sue-09	0,112	sue-26	0,057	sue-43	0,054
sue-10	0,071	sue-27	0,037	sue-44	0,088
sue-11	0,078	sue-28	0,114	sue-45	0,071
sue-13	0,054	sue-29	0,126	sue-46	0,019
sue-14	0,079	sue-30	0,068	sue-47	0,318
sue-16	0,066	sue-31	0,012	sue-48	0,098
				sue-49	0,031
<b>Promedio</b>	<b>SD</b>	<b>Valor mínimo</b>		<b>Valor máximo</b>	<b>CV</b>
<b>0,073</b>	<b>0,051</b>	<b>0,012</b>		<b>0,318</b>	<b>71%</b>

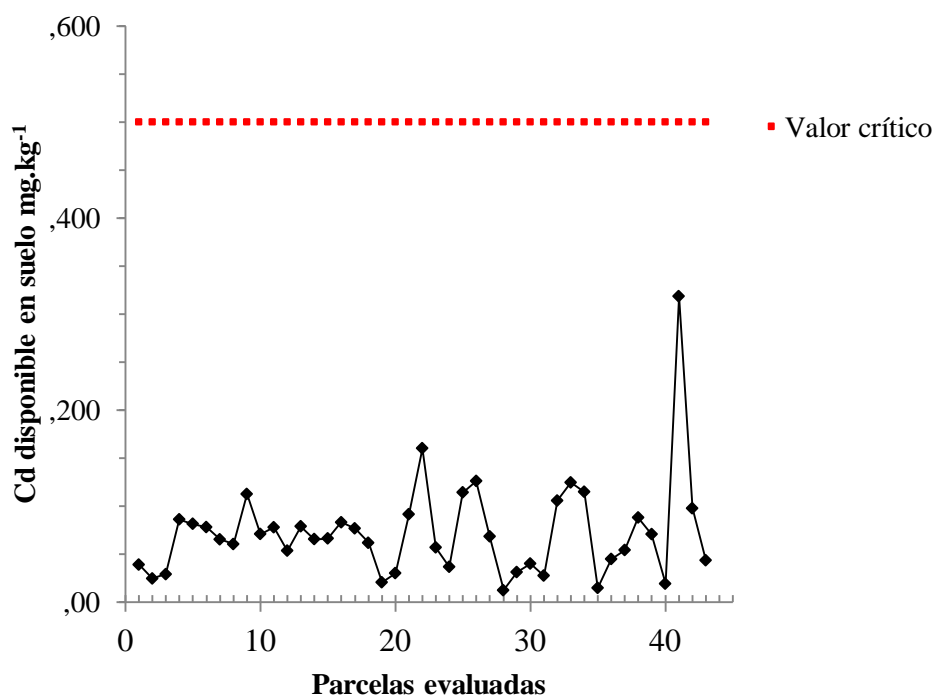


Figura 3.24. Valores de cadmio disponible en suelo

La legislación española, reportó los valores límites de concentración de Cd en suelos en función del pH. A valores de pH por debajo de 7 el contenido de Cd debe ser  $3 \text{ mg.kg}^{-1}$  y para valores mayores a siete  $1 \text{ mg.kg}^{-1}$  (Boletín Oficial Español, 1990). De acuerdo con éste criterio para suelos ácidos, como los evaluados en este estudio,  $3 \text{ mg.kg}^{-1}$  representa la máxima cantidad de Cd aceptable, el valor más alto medido en el suelo fue  $0,32 \text{ mg.kg}^{-1}$  (Cuadro 3.12); por lo cual, los suelos arroceros del Sistema de Riego de Río Guárico no tienen problemas de contaminación con Cd.

En suelos de la cuenca baja del río Guayas (Ecuador), utilizados en el cultivo de arroz; se determinó Cd y otros metales pesados, en 26 puntos de muestreo el contenido de Cd estuvo entre  $0,04 - 0,39 \text{ mg.kg}^{-1}$ , con un valor promedio de  $0,15 \text{ mg.kg}^{-1}$  (Pozo et al., 2011).

### 3.5.1. Relación entre el Cd disponible y las variables de suelo

Para calcular la correlación entre el Cd y las variables del suelo, se descartaron dos valores (0,160 y 0,318mg.kg<sup>-1</sup>) por estar muy alejados de la media encontrada. Los resultados se muestran en el cuadro 3.13.

Cuadro 3.13: Coeficientes de correlación ( $p \leq 0,05$ ) entre el Cd disponible en suelo y el pH, Ca, Zn, MO, CIC y arcilla de los suelos.

	pH	Ca	Zn	MO	CIC	Arcilla
Cd	0,42	0,78	0,56	0,71	0,77	0,74

El pH, Ca, Zn, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y porcentaje de arcilla correlacionaron positiva y significativamente con el Cd disponible del suelo. El coeficiente de correlación más bajo de 0,42 correspondió al pH y el valor más alto (0,77) a la CIC, lo que señala mayor asociación entre el Cd y la CIC. Se esperaría una correlación negativa entre el Cd y el pH, al incrementarse el pH se forman compuestos como Cd(OH)<sup>+</sup> que no ocupan un lugar en la zona de intercambio (Kabata-Pendias y Pendias, 1984), además que a pH moderadamente alto se produce la precipitación como hidróxidos (García y Dorronsoro, 2004).

En los suelos arroceros del Guárico no hay variaciones grandes de pH, todos son suelos ácidos que bajo condiciones de inundación tienden alcanzar un pH cercano a la neutralidad, quizás por eso no se encontró una correlación negativa entre el pH y el Cd disponible en suelo; además hay trabajos que reportan la no dependencia del contenido del metal con respecto al pH (Babich y Stotzky, 1978). Se encontró que no hubo relación lineal entre el Cd disponible y el pH, el coeficiente de regresión fue bajo (0,17).

El Cd de los suelos se correlacionó positiva y significativamente con la materia orgánica, el coeficiente de correlación fue 0,71. Esto se explica porque al descomponerse la materia orgánica se forman complejos solubles (quelatos), el Cd en el suelo se combina con las cargas negativas (ácidos orgánicos) de la materia orgánica humificada (Alloway, 1995).

Al determinar el grado de dependencia entre el Cd y la MO se obtuvo el modelo lineal  $Y = 40,451X - 48,593$ .  $R^2 = 0,5086$ ; el cual determinó que sólo el 51% del Cd disponible puede explicarse por la variación de la MO.

El coeficiente de correlación entre el Cd y contenido de arcilla fue uno de los más alto (0,77), lo que significa una buena asociación entre estas variables. Este comportamiento se explica porque al haber mayor contenido de arcilla también habrá mayor superficie para adsorber el Cd, los minerales como óxido de hierro son importantes en suelos bajo condiciones de reducción, ya que los minerales tienden adsorber menos al metal dejándolo más móvil (Tack et al., 2006). El grado de dependencia entre estas variables se explica por el coeficiente de determinación  $R^2 = 0,5425$  del modelo lineal:  $Y = 1,8465X + 2,9863$ ; que indica que la disponibilidad del Cd en el suelo depende en un 54 % de la cantidad de arcilla.

El Cd y el Ca correlacionaron positivamente, el coeficiente fue de 0,78 lo que indica que hay buena asociación entre ambos metales. Se esperaría que el Ca por tener menor radio iónico que el cadmio fuese más atraído por los oxígenos de los vértices en la estructura cristalina; por lo cual, al haber mayor concentración de Ca en el complejo de cambio debería haber menos de Cd; sin embargo, la asociación es positiva, lo que podría estar sucediendo es que cuando el sistema está en equilibrio, al haber mayor cantidad de Ca, habrá mayor posibilidad que el Ca forme parte del complejo de cambio y mayor cantidad de Cd se desorberá del mismo. La dependencia entre el Cd y el calcio se pudo explicar mediante el coeficiente de determinación  $R^2 = 0,6124$  del modelo lineal  $Y = 0,0335X + 22,995$ ; lo que indica que el 61% del contenido de Cd en el suelo puede ser explicado por la variación del Ca.



La relación positiva entre el Cd y la CIC no concuerda con lo esperado, ya que al aumentar la capacidad de intercambio de cationes, se reporta mayor adsorción del metal y menor disponibilidad de Cd (Estévez et al. 1998). La dependencia entre el Cd y la CIC se pudo explicar de acuerdo al coeficiente de determinación  $R^2 = 0,5874$  del modelo lineal  $Y = 6,3305X + 24,473$ , que indica que el 59% del Cd disponible se explica por la variación de la CIC.

Finalmente, la correlación positiva entre el Cd y el Zn del suelo se corresponde con lo reportado por Estévez et al. (1998); el cual determinó que la presencia de Zn favorece la movilidad y disponibilidad de Cd. Se determinó la dependencia entre el Cd disponible y el Zn, no hubo relación lineal entre estos metales debido al bajo coeficiente de regresión.

### 3.5.2. Relación entre el Cd disponible y las formas de P en el suelo

Para dar cumplimiento al objetivo uno, se correlacionó el Cd disponible en el suelo con los años de fertilización fosfatada, el P disponible determinado por Olsen, Bray I, Mehlich III y con todas las formas de Pi y Po obtenidas del fraccionamiento de P; del análisis sólo las fracciones que mostraron los coeficientes de correlación significativos están en el cuadro 3.14. No se encontró correlación significativa entre el contenido de Cd disponible y los años de fertilización fosfatada, el P disponible por Olsen, Bray I, Mehlich III, las fracciones de PiR, PiL, PiML y todas las fracciones de Po.

Cuadro 3.14: Coeficientes de correlación para  $p \leq 0,05$  entre el Cd disponible en suelo y las formas de Pi en el suelo.

	PiLL	PiO	PiRC	PiT
Cd	0,54	0,70	0,77	0,78

El cuadro 3.14 muestra que la fracción de PiLL fue la que presentó menor coeficiente de correlación (0,54). El mayor valor (0,78) fue para la suma de todas fracciones inorgánicas (PiT), lo que indica que el Cd disponible en el suelo está asociado a las formas de Pi, en especial con las formas de Pi ocluidas y Pi recalcitrantes.

Los datos de Cd disponible y PiT se ajustaron bien a un modelo de regresión lineal donde el coeficiente  $R^2$  fue igual a 0,60 (Figura 3.25).

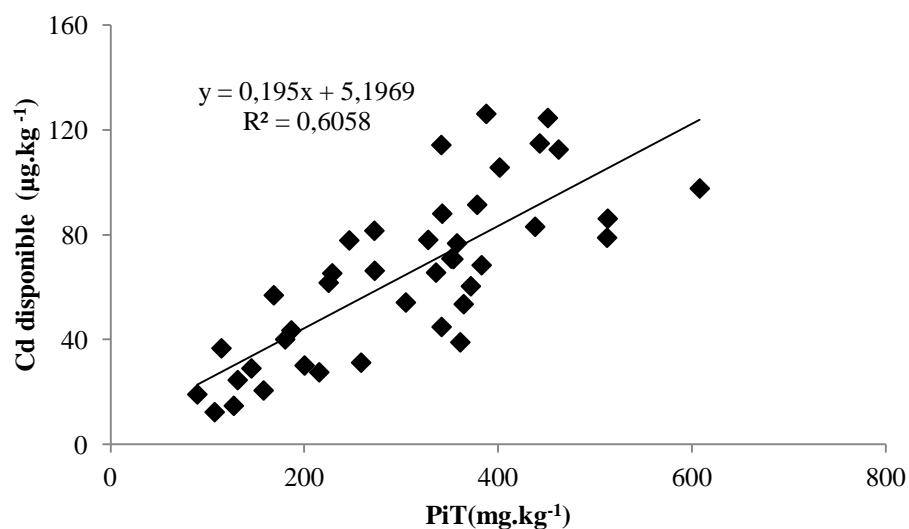


Figura 3.25. Relación entre el cadmio disponible en suelo y PiT en los suelo del Sistema de Riego del Río Guárico.

La figura 3.25, muestra los datos ajustados a un modelo de regresión lineal entre el Cd disponible y el PiT. Se observa que al incrementarse el contenido de Pi en el suelo, el contenido de Cd disponible también aumenta, quizás asociado a la fertilización continua con fosfatos, los cuales podrían aportar cierta cantidad de cadmio, originario de la roca fosfórica, materia prima para la fabricación de los fertilizantes (Rothbaum et al., 1986; Smolders et al., 1999; Herrera, 2000; Salviano et al., 2006). Maracara y Niño, 2004) encontraron de 6,5 a 8 mg.kg<sup>-1</sup> de Cd en los fertilizantes fosfatados producidos en el país.

Bonomelli et al. (2003), realizaron un estudio con cuatro suelos de Chile: Inceptisol, Andisol, Alfisol, Ultisol; con dos tratamientos: sin fertilizar y fertilizando con Súper Fosfato Triple ( $53,2 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ Cd}$ ) encontrando que en todos los suelos la cantidad de Cd disponible fue mayor en los tratamientos fertilizados con P en relación a los testigos sin aplicación de fertilizante. También, Al-Faiyz et al. (2007), encontraron en tres suelos cultivados con tomate, lechuga y rábano, que al incrementarse el contenido de P por las fertilizaciones, incrementaba el contenido de Cd en suelo, correlacionando significativamente el P disponible con el Cd disponible en suelo.

Los suelos del Sistema de riego del Río Guárico, son ácidos y deficientes de P; por lo cual requirieron de dosis significativas de fertilizantes fosfatados durante muchos años. El 58 % de los suelos (25) han sido fertilizados por 20 ó más años; sin embargo, no se encontró impacto significativo de la aplicación de los fertilizantes fosfatados, quizás asociado a que la información referente a los años de fertilización fue suministrada por el agricultor. Lamentablemente no se pudo obtener información sobre la procedencia de los fertilizantes y las dosis aplicadas, ya que de eso depende cuánto cadmio había en el fertilizante, y cuánto podría estar aportando al suelo. Sin embargo, los niveles de Cd encontrados en los suelos están por debajo del límite considerado como contaminante, a pesar de la aplicación de fertilizantes fosfatados por muchos años. Bonomelli et al. (2003), determinaron que no hubo efecto significativo del tiempo sobre el contenido de Cd en suelos de Chile (Inceptisol, Andisol, Alfisol, Ultisol) fertilizados con Súper Fosfato Triple (que contenían  $53,2 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ Cd}$ ); además no encontraron interacción significativa entre la dosis y el tiempo de incubación sobre la concentración de Cd disponible en ninguno de los suelos. También, Richards et al. (1998) encontraron que no hubo evidencia de que el suelo se enriqueciera con Cd luego de la aplicación de fertilizantes fosfatados durante 29 años en suelos de Inglaterra.

La figura 3.26 muestra la relación entre el cadmio disponible en suelo y las fracciones de P no disponibles; que corresponden a la suma de las fracciones de PiLL, PiO y PiRC. Se

observa que al incrementarse el Cd disponible en el suelo también aumentan las formas de P no disponibles para la planta. Los datos se ajustaron a un modelo de regresión lineal con un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0,64$ ; que indica que el 64 % del Cd disponible se explica mediante la variación de las fracciones de Pi no disponible; esta tendencia podría sugerir que el Cd forma parte de la estructura cristalina de las apatitas y podría haber sustituido al Ca en algunos de enlaces con P, éste mineral tiene P asociado a enlaces con compuestos de calcio como la fluorapatita, carbonato apatita, hidroxiapatita, fosfato tricálcico; los cuales forman parte de la estructura del mineral y no están disponibles para la planta, son formas de P recalcitrantes que sólo pueden ser extraídas por la acción de agentes oxidantes fuertes como el ácido sulfúrico-peróxido, ácido clorhídrico concentrado y caliente.

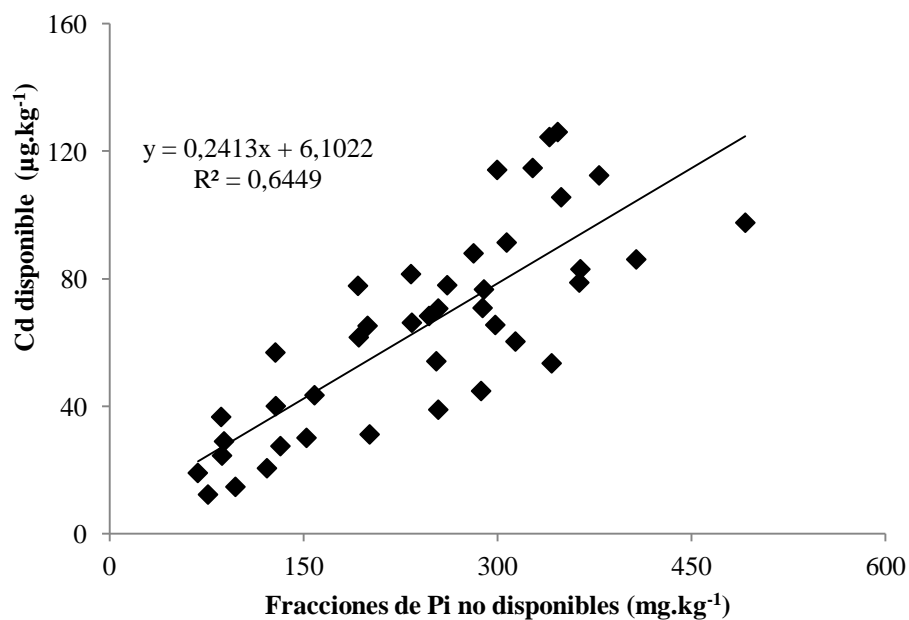


Figura 3.26. Relación entre el Cd disponible y las fracciones de Pi no disponibles

### 3.6. Evaluación del contenido de P en planta

Los valores de P en el grano, cascarilla, rastrojo (hojas y tallos) y planta de arroz (sumatoria de P en grano, cascarilla y rastrojo) para las distintas parcelas evaluadas se muestra en el cuadro 3.15. El P en el grano de arroz varió entre 0,09 y 0,16 %, con un promedio de 0,13 %. El P en la cascarilla estuvo entre 0,12 y 0,20 %, con un promedio de 0,16 %. El P en el rastrojo se ubicó entre 0,05 y 0,24 %, con un promedio de 0,11 % y el P en la planta osciló entre 0,09 y 0,20 %, con un promedio de 0,13 %. El porcentaje de P en la planta se determinó como la suma de las fracciones del P en el follaje de la planta.

Cuadro 3.15: Porcentaje de P en el grano, cascarilla, rastrojo y planta de arroz.

Muestra	% Fósforo			
	Grano	Cascarilla	Rastrojo	Planta
sue-01	0,15	0,18	0,16	0,16
sue-02	0,15	0,18	0,13	0,14
sue-03	0,14	0,20	0,13	0,14
sue-04	0,14	0,16	0,16	0,16
sue-05	0,14	0,18	0,15	0,15
sue-06	0,15	0,16	0,12	0,14
sue-07	0,13	0,17	0,05	0,10
sue-08	0,14	0,16	0,08	0,12
sue-09	0,11	0,20	0,10	0,12
sue-10	0,12	0,15	0,13	0,13
sue-11	0,14	0,17	0,15	0,15
sue-13	0,12	0,18	0,12	0,13
sue-14	0,12	0,16	0,10	0,12
sue-16	0,12	0,16	0,06	0,10
sue-17	0,12	0,16	0,08	0,11
sue-18	0,14	0,15	0,09	0,12
sue-19	0,11	0,17	0,09	0,11
sue-20	0,10	0,15	0,12	0,12
sue-21	0,09	0,15	0,06	0,09
sue-22	0,13	0,19	0,15	0,15

Muestra	% Fósforo			
	Grano	Cascarilla	Rastrojo	Planta
sue-23	0,16	0,14	0,13	0,15
sue-24	0,12	0,17	0,16	0,14
sue-26	0,12	0,15	0,14	0,14
sue-27	0,11	0,19	0,13	0,13
sue-28	0,12	0,13	0,08	0,10
sue-29	0,10	0,20	0,06	0,09
sue-30	0,15	0,18	0,24	0,20
sue-31	0,10	0,15	0,08	0,10
sue-33	0,16	0,15	0,18	0,17
sue-34	0,10	0,14	0,17	0,14
sue-35	0,13	0,19	0,09	0,12
sue-36	0,10	0,18	0,10	0,11
sue-37	0,13	0,15	0,07	0,10
sue-38	0,12	0,15	0,07	0,10
sue-40	0,10	0,17	0,06	0,10
sue-41	0,15	0,12	0,09	0,12
sue-43	0,12	0,16	0,14	0,14
sue-44	0,10	0,13	0,13	0,12
sue-45	0,13	0,19	0,11	0,13
sue-46	0,15	0,18	0,07	0,12
sue-47	0,13	0,17	0,13	0,14
sue-48	0,11	0,15	0,08	0,10
sue-49	0,14	0,13	0,10	0,12
<b>Promedio</b>	<b>0,13</b>	<b>0,16</b>	<b>0,11</b>	<b>0,13</b>
<b>SD</b>	<b>0,019</b>	<b>0,019</b>	<b>0,040</b>	<b>0,023</b>
<b>Máximo</b>	<b>0,16</b>	<b>0,20</b>	<b>0,24</b>	<b>0,20</b>
<b>Mínimo</b>	<b>0,09</b>	<b>0,12</b>	<b>0,05</b>	<b>0,09</b>
<b>CV</b>	<b>15</b>	<b>12</b>	<b>35</b>	<b>18</b>

La SD determinada en cada fracción indica que hay poca dispersión de los datos con respecto al valor promedio.

Okada et al. (2007), encontraron en su estudio de 40 muestras de arroz pulido de Brasil que en promedio el porcentaje de P en el grano de arroz fue de 0,092 %, en cambio Sun et al. (2000), reportaron que fue 0,15 %; estos valores están cercanos al promedio de P encontrado en el grano en los 43 suelos del Guárico.

Dobermann y Fairhurst (2000), determinaron que los niveles óptimos de P en la paja de arroz se encontraba entre 0,1- 0,15 %; en nuestro trabajo el promedio de P en el rastrojo estuvo dentro del rango óptimo, sólo 5 suelos presentaron valores menores ó iguales a 0,06% que es el nivel crítico para la deficiencia de P.

El P determinado en el rastrojo fue el que presentó mayor dispersión en los resultados, con un CV de 35 %, que indica que los datos son heterogéneos (Spiegel, 1991), justificado por las desigualdad en la absorción de P entre los cultivares y por los niveles de P entre parcelas, estas diferencias se reflejaron más acentuadamente en la parte aérea de planta de arroz.

### **3.6.1. Distribución del contenido de P en la planta**

La figura 3.27, muestra la distribución del P en las distintas partes aéreas de la planta de arroz, se observó, que el fósforo absorbido se distribuyó principalmente entre el rastrojo y en el grano. El porcentaje de P en el grano varió entre 26-56 % del P total; el promedio fue de 38,7 %; 23 muestras de grano (53 %) presentaron valores inferiores al promedio. El porcentaje de P en la cascarilla estuvo entre 12-30 % del P total, con un promedio de 19 %, 22 muestras con cascarilla (51,1%) presentaron menos del promedio. En el rastrojo el porcentaje de P varió entre 21-61 %, con un promedio de 42%, 22 muestras de rastrojo (51,1) % presentaron contenidos de P superiores al 40 %.

Solórzano (2003) indicó que en la variedad Cimarrón, el 51 % del P se acumuló en las panículas y el 49 % en tallos y hojas; en cambio Perdomo et al. (1983) encontraron en la variedad IR-36, el 85 % del P se acumuló en el grano y sólo 15 % o menos permaneció en rastrojo, con respecto P total absorbido por la planta. En nuestro trabajo se encontró en siete

variedades de arroz (Fedearroz 50, Colombia 21, Venezuela 21, Cimarron, Coprocen, D-sativa, D-Oriza) sembradas en 32 de las 43 parcelas, que la suma del P en el grano más cascarilla fue mayor a 51% del P total, quedando el 49% en el rastrojo.

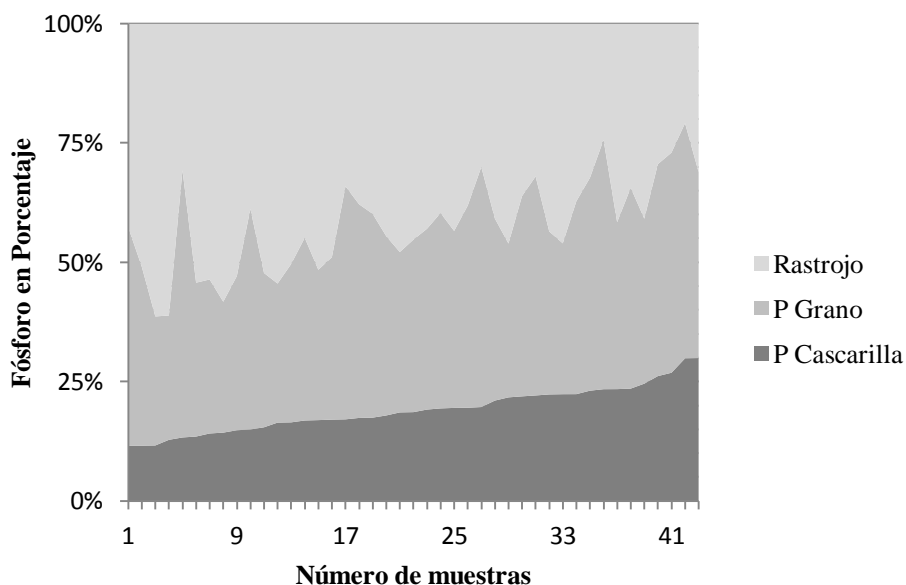


Figura 3.27: Distribución porcentual del contenido de P en el follaje de la planta de arroz

En los suelos cultivados en Guárico, el P en el follaje de arroz se distribuyó en promedio en 58 % entre el grano más cascarilla y un 42 % en el rastrojo.

### 3.6.2. Relaciones entre el contenido de P en la planta y las distintas formas de P en el suelo

Para dar respuesta al objetivo N° 4 se relacionó el fósforo de la fracción resina y el determinado por los métodos Olsen, Bray I y Mehlich III con el fósforo absorbido por la



planta  $\text{mg.kg}^{-1}$  (P grano + P cascarilla + P rastrojo). El cuadro 3.16 muestra sólo los coeficientes de correlación significativos encontrados. El P en la planta no correlacionó con el PiR y con P Olsen, pero si con el el P Bray I y PMehlich III.

Cuadro 3.16: Coeficientes de correlación ( $p \leq 0,05$ ) entre el P absorbido por la planta ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) con el P Bray I y P Mehlich III.

	PBray I	PMehlich III
PPlanta	0,44	0,32

Los coeficientes de correlación fueron bajos, 0,32 para Mehlich III y 0,44 para Bray I, lo que parece indicar que existe una mayor asociación del P extraído por Bray I que con Mehlich III. Sin embargo, los coeficientes de determinación calculados para los modelos lineales fueron muy bajos, señalando la poca dependencia del P en la planta con el P disponible en el suelo medido por éstos métodos.

Para dar respuesta al objetivo N° 3 se determinó si el P absorbido por la planta se correlacionaba con alguna de las fracciones de Pi ó Po presentes en el suelo. Se encontró que sólo la fracción de PiL correlacionó con el P absorbido (Cuadro 3.17). El cuadro 3.17 muestra que el coeficiente de correlación fue bajo (0,35), por lo cual, no se espera asociación entre estas variables.

Cuadro 3.17: Coeficientes de correlación ( $p \leq 0,05$ ) entre el P absorbido por la planta y el PiL

	PiL
P Planta	0,35

La correlación positiva y significativa entre el P en la planta y el PiL es un comportamiento esperado, ya que en la fracción de PiL se considera que es la forma disponible para las plantas. Sin embargo, el coeficiente de correlación fue bajo, sólo de 0,32. El coeficiente de determinación para la regresión fue 0,13; señalando que el P en la planta no depende del PiL. Schmidt et al. (1996), señalaron que las fracciones de Pi lábiles extraídas con  $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{NaOH}$  son fuente de P para las plantas de soya y maíz bajo condiciones de deficiencia de P. Contrario a lo encontrado en los suelos arroceros del Guárico, Fernández et al. (2006), mostraron que el cultivo de arroz bajo inundación produjo la disminución de la mayoría de las formas de fósforo en un Alfisol.

De acuerdo con Suñer et al. (2000) en los suelos cultivados por 40 y 60 años las plantas extraen menor cantidad de P inorgánico, que el que pudiera estar disponible producto de la descomposición de la materia orgánica, el exceso del P inorgánico forma compuestos de baja solubilidad como la apatita y/o brushita.

### **3.7. Determinación de cadmio en el follaje de las plantas de arroz**

El contenido de Cd en el grano, cascarilla y rastrojo de arroz, fue variable y bajo, sólo quince de las cuarenta y tres muestras evaluadas contenían Cd en el grano, con valores entre 19,70 y 253,60  $\mu\text{g.kg}^{-1}$ , con un promedio de 18,62  $\mu\text{g.kg}^{-1}$ . De acuerdo con la FAO-OMS (2007) el valor límite aceptable de Cd en el grano de arroz es de 400  $\mu\text{g.kg}^{-1}$ , muy por encima los valores encontrados en nuestro trabajo. El Cd en la cascarilla estuvo comprendido entre 4,34 y 164,90  $\mu\text{g.kg}^{-1}$ , con un valor promedio de 29,80  $\mu\text{g.kg}^{-1}$  y en el rastrojo varió entre 9,35 y 464,20  $\mu\text{g.kg}^{-1}$ , con un valor promedio de 45,42  $\mu\text{g.kg}^{-1}$  (Cuadro 3.18), Iranzo et al. (2004) encontraron que el Cd en el rastrojo de arroz fue de 0,12  $\text{mg.kg}^{-1}$ , sólo 2 valores de los obtenidos en nuestro trabajo estuvieron por encima de los reportados por ellos. El cadmio en la planta se calculó como la suma de las fracciones del Cd en el

grano, cascarilla y rastrojo. Se encontró que el Cd en la planta varió entre 0,32 y 358,30  $\mu\text{g.kg}^{-1}$  con un promedio de 33,88  $\mu\text{g.kg}^{-1}$

Cuadro 3.18. Años de fertilización fosfatada y contenido de Cd en el grano, en la cascarilla, en el rastrojo y en la planta de arroz.

Muestra	Años	Cd $\mu\text{g.kg}^{-1}$			
		Grano	Cascarilla	Rastrojo	Planta
sue-01	13	0,00	25,60	0,00	3,91
sue-02	-	0,00	68,50	0,00	10,35
sue-03	16,5	0,00	0,00	0,00	0,00
sue-04	32	0,00	69,70	0,00	9,05
sue-05	40	0,00	4,34	0,00	0,72
sue-06	20	0,00	0,00	0,00	0,00
sue-07	50	0,00	25,50	0,00	4,40
sue-08	9	0,00	18,70	39,80	21,72
sue-09	45	0,00	52,90	31,80	24,04
sue-10	10	0,02	0,00	106,40	62,09
sue-11	40	0,00	0,00	0,00	0,00
sue-13	10	0,01	37,40	0,00	5,16
sue-14	30	0,01	23,70	0,00	4,21
sue-16	5	55,60	45,40	56,10	54,11
sue-17	5	61,00	17,40	45,30	47,49
sue-18	30	50,70	18,70	22,40	33,24
sue-19	20	58,30	0,00	9,35	27,84
sue-20	-	47,60	0,00	0,00	18,59
sue-21	40	29,50	30,40	0,00	15,76
sue-22	48	31,90	0,00	13,70	17,98
sue-23	50	0,00	48,00	54,90	31,71
sue-24	25	0,00	0,00	82,70	37,55
sue-26	40	29,10	21,80	108,10	68,50

Muestra	Años	Cd $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$			
		Grano	Cascarilla	Rastrojo	Planta
sue-27	30	0,00	17,40	29,20	16,99
sue-28	40	0,00	33,00	36,10	21,81
sue-29	35	0,00	24,90	23,60	14,95
sue-30	45	0,00	47,80	127,40	71,55
sue-31	5	0,00	32,40	0,00	4,78
sue-33	51	0,00	52,90	79,20	45,18
sue-34	30	0,00	12,40	24,30	13,91
sue-35	30	0,00	54,10	65,30	38,96
sue-36	40	0,00	46,80	29,30	20,54
sue-37	10	253,60	164,90	464,20	358,30
sue-38	15	0,00	21,10	51,50	25,69
sue-40	18	37,60	63,30	0,00	25,03
sue-41	30	23,60	0,00	8,08	13,81
sue-43	40	0,00	0,00	36,60	18,67
sue-44	-	0,00	0,00	29,00	13,71
sue-45	-	65,20	52,40	209,10	131,67
sue-46	-	20,00	35,50	39,30	30,44
sue-47	-	17,20	29,70	37,80	28,74
sue-48	-	0,00	49,20	0,00	7,25
sue-49	30	19,70	35,50	92,70	56,53
<b>Promedio</b>	-	<b>18,62</b>	<b>29,80</b>	<b>45,42</b>	<b>33,88</b>
<b>SD</b>	-	<b>42,11</b>	<b>30,02</b>	<b>78,57</b>	<b>56,47</b>
<b>Máximo</b>	-	<b>253,60</b>	<b>164,90</b>	<b>464,20</b>	<b>358,30</b>
<b>Mínimo</b>	-	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
<b>CV</b>	-	<b>226</b>	<b>101</b>	<b>173</b>	<b>167</b>

La SD determinada en cada fracción indica que hay gran dispersión de los datos con respecto al valor promedio, por lo cual, la media deja de ser un valor representativo de los 43 muestras. Los valores de CV superiores a 100 %, pueden explicarse, porque se trata de

muestras muy heterogéneas que corresponden a parcelas con diferentes tipos de manejo del cultivo, suelo, fertilización y diversos materiales genéticos. Yu et al. (2006), encontraron en 43 cultivares de arroz que el Cd es genotipo dependiente del suelo, además señalaron que es posible producir variedades cuyas partes comestibles acumulen un nivel de Cd lo suficientemente bajo para que el consumo sea seguro. También, Liu et al. (2003), determinaron que hubo diferencias significativas en la absorción y distribución de Cd en raíces y tallo de 20 cultivares de arroz.

Contrario a la información anterior, Liu et al. (2007), encontraron en seis cultivares de arroz que la absorción de Cd no fue en su mayoría significativa ( $p < 0,05$ ); sin embargo, si hubo diferencias significativas para el tipo de arroz, los cultivares tipo indica acumularon más Cd que los cultivares japónica.

### 3.7.1. Distribución del cadmio en el follaje de la planta de arroz

Al distribuir porcentualmente el cadmio en el follaje de la planta se formaron varios grupos, de acuerdo a la parte de la planta considerada (Cuadro 3.19).

Cuadro 3.19 Distribución por grupos del Cd en las diferentes partes del follaje

Grupo (N° muestras)		Parte de la planta	Porcentaje del grupo
1	17	Rastrojo + Cascarilla	39,5
2	9	Grano + Cascarilla + Rastrojo	20,9
3	5	Grano + Rastrojo	11,6
4	4	Rastrojo	9,3
5	4	Cascarilla	9,3
6	2	Grano	4,6
7	2	Grano + Cascarilla	4,6

En el cuadro 3.19 se observa el número de muestras contenidas en cada grupo, las partes de la planta con Cd y el porcentaje que representa el grupo con respecto a las 43 muestras.

El grupo 1, formado por cascarilla y rastrojo, fue el más grande, es decir ocupó el 39,5 % del total de muestras. La distribución del Cd entre la cascarilla y rastrojo se muestra en la figura 3.28.

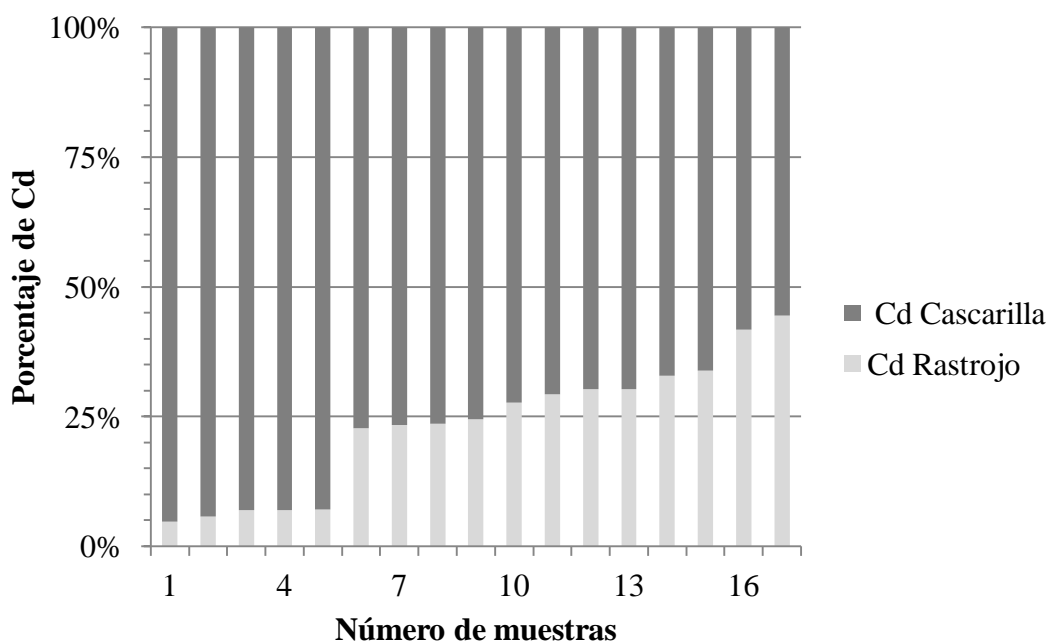


Figura 3.28: Distribución del Cd en muestras que sólo contenían Cd en cascarilla y rastrojo

La figura 3.28, muestra la distribución del cadmio en un grupo de planta de arroz (17) en donde el cadmio absorbido se repartió entre rastrojo y cascarilla; en promedio el Cd se acumuló en la cascarilla (76,8%) en todas las muestras.

El grupo 2 fue el único con Cd repartido entre grano, cascarilla y rastrojo (Figura 3.29). La figura 3.26, muestra la distribución porcentual del cadmio en un grupo de nueve muestras de plantas. El Cd en el grano mostró estar por encima de la cascarilla y del rastrojo. En tres de las nueve muestras, el Cd acumulado en el rastrojo fue consistentemente mayor que el

encontrado la cascarilla. Estos resultados son contrarios a lo publicado por Liu et al. (2003) quienes encontraron que el Cd absorbido por plantas de arroz se localizó principalmente en raíz y tallo (más de 98%), y sólo una porción muy pequeña fue trasladada en grano (alrededor del 0,73%).

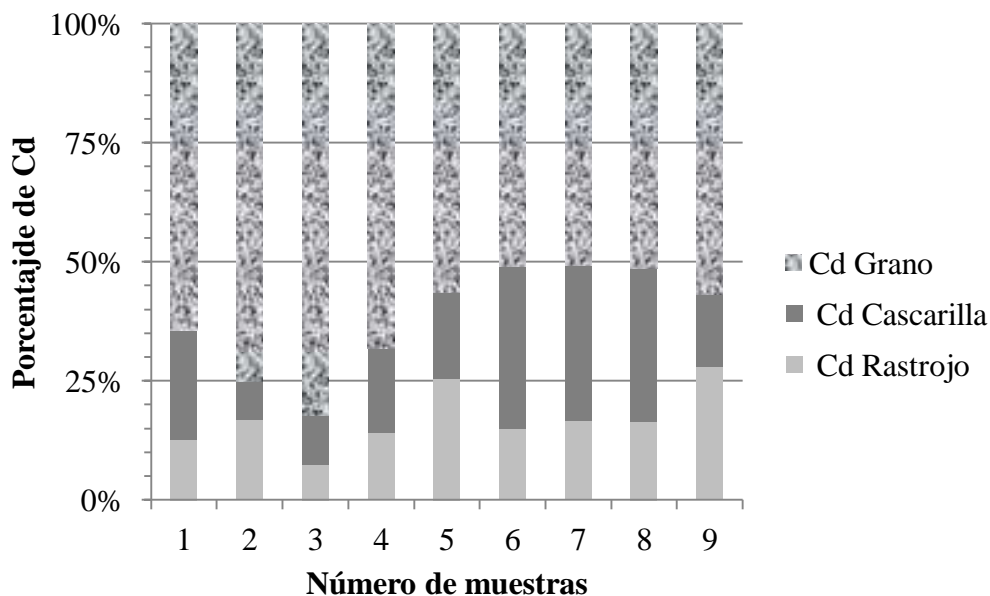


Figura 3.29: Distribución del Cd en el follaje de las plantas evaluadas.

En el grupo 3, el Cd se distribuyó entre rastrojo y grano (Figura 3.30). La figura 3.30, muestra la distribución porcentual del cadmio en un grupo de muestras (11,6%) que contenían cadmio en rastrojo y grano. Se observa que el Cd se localizó principalmente en el grano en todas las plantas con 89,8% en promedio, con respecto al rastrojo que presentó 10,2%, la muestra con mayor contenido de Cd en rastrojo fue de 14,8%, señalando la gran capacidad de la planta para acumular Cd en el grano.

El grupo 4 presentó Cd sólo en el rastrojo, el grupo 5 sólo en cascarilla, el grupo 6 sólo en el grano y en el grupo 7 se determinó que en promedio el Cd se acumuló en el grano 68% y 32 % en cascarilla.

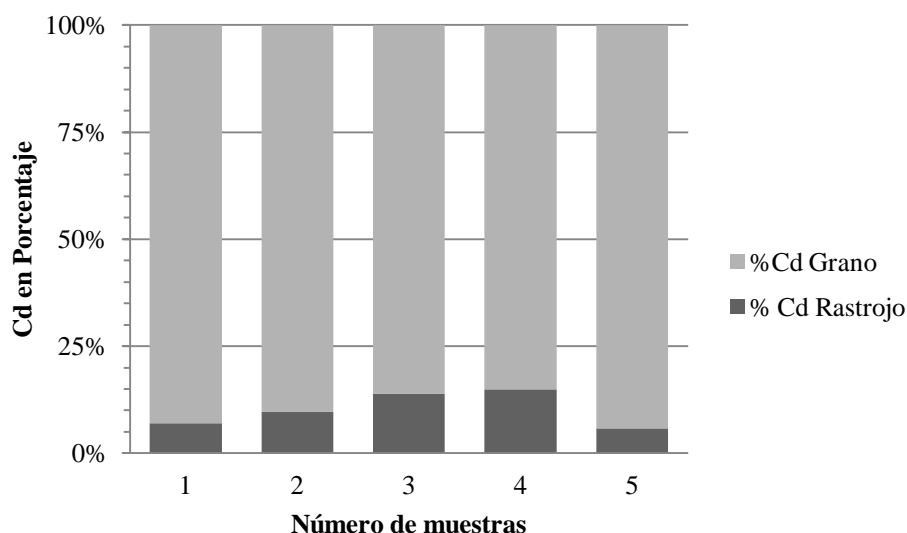


Figura 3.30: Distribución del Cd en muestras que sólo contenían Cd en cascarilla y rastrojo

Finalmente, se puede decir que el Cd se distribuyó principalmente en el grano de arroz, cuando hay Cd en rastrojo, cascarilla y grano; también cuando el Cd está en rastrojo y grano, y cuando el Cd está en cascarilla y grano. Cuando el Cd está entre la cascarilla y el rastrojo, el Cd se localizó mayoritariamente en la cascarilla. Al parecer en los suelos arroceros del Guárico las plantas absorben las pequeñas cantidades de Cd que hay en el suelo y lo trasladan al grano.

### 3.7.2. Correlaciones entre el cadmio en el follaje de la planta de arroz y algunas variables de suelo

Para dar respuesta al objetivo número dos, se correlacionó el Cd en la planta y el Cd en el grano de arroz con respecto al Cd, Ca, Zn y P disponible en el suelo. Se encontró que los coeficientes de correlación entre Cd en la planta y en el grano con respecto al Cd, Zn y P disponible en el suelo no fue significativo ( $p \leq 0,05$ ), sólo la correlación entre el Cd en el grano de arroz y el calcio disponible en el suelo fue significativa. En la figura 3.31 se



observa que la dependencia entre las variables se puede explicar mediante la ecuación:  $Y = 0,074X - 28,73$ .  $R^2 = 0,7067$ ; el coeficiente de determinación, indica que el 71 % de Cd presente en el grano de arroz se explica mediante el Ca disponible en el suelo. La relación sugiere que al haber mayor contenido de calcio disponible en el suelo mayor será la acumulación de Cd en el grano de arroz, lo cual podría ocurrir porque el cadmio es un catión más grande que el calcio, por lo cual, el calcio al presentar menos efecto estérico y mayor interacción con las partículas coloidales del suelo se queda más tiempo adsorbido en el complejo de cambio y el cadmio puede ser absorbido por la planta. Diaz et al. (2005) encontraron patrones de concentraciones muy similares entre los iones  $Ca^{2+}$  y  $Cd^{2+}$  atribuidos a la semejanza de las características periódicas, relacionadas al radio iónico y número de valencia. Esta afinidad química puede representar un problema inquietante, considerando que el calcio es un nutriente del suelo y el cadmio es un elemento potencialmente tóxico. Debido a su afinidad química, el  $Cd^{2+}$  tenderá a competir por sitios activos para su adsorción, esto puede tener consecuencias problemáticas si estos sitios se encuentran en las plantas.

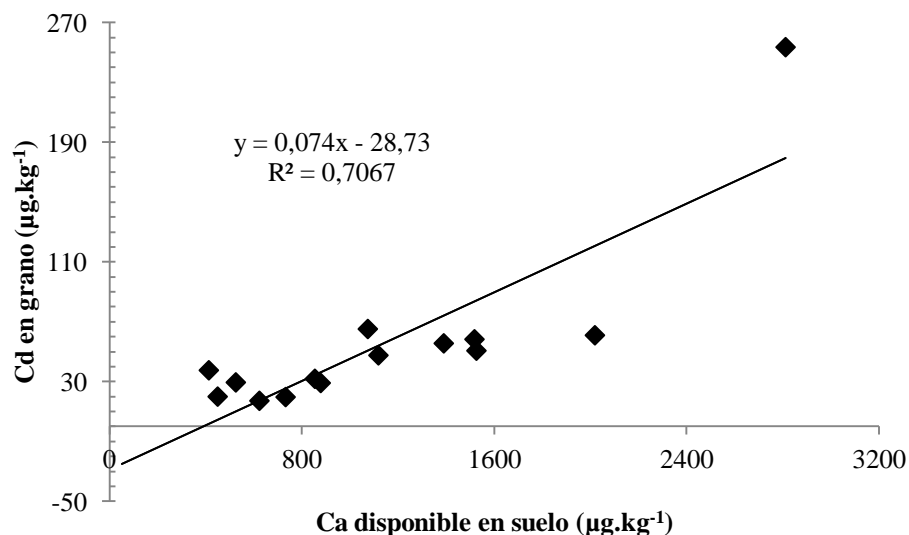


Figura 3.31: Relación entre el Cd en el grano de arroz y el calcio disponible en el suelo.

Los transportadores de cationes, implicados en el transporte de calcio a la vacuola, también pueden incluir en este proceso otros metales como el cadmio (Park et al., 2005).

Se calcularon las correlaciones entre el Cd absorbido por la planta y el Cd en el grano de arroz con las fracciones de Pi y Po del suelo. El PoML se correlacionó significativamente ( $p \leq 0,05$ ) con el Cd en la planta y con el Cd en el grano. Se podría atribuir la correlación a que el NaOH extrae los fosfatos orgánicos asociados a los ácidos fúlvicos y húmicos (Boschetti et al. 2003). Los compuestos orgánicos se podrían combinar con el  $\text{Cd}^{2+}$  y así ser absorbidos por la planta. Al determinar la dependencia entre el Cd en la planta con la fracción de PoML se obtuvo la ecuación lineal con  $R^2 = 0,1088$ . También se determinó la regresión entre el Cd en el grano y la fracción extraída de PoML, y se obtuvo la ecuación con  $R^2 = 0,1642$ , dado los bajos valores de los coeficientes de determinación, la relación lineal no es representativa.

## CONCLUSIONES

- La fertilización fosfatada por largos períodos de tiempo no ocasionó, en los suelos cultivados con arroz en el Sistema de Riego del Río Guárico, problemas de contaminación con Cd. Todos los valores de Cd disponible encontrados en los suelos están por debajo del valor crítico de  $0,8 \text{ mg.kg}^{-1}$ .
- El fósforo inorgánico en los suelos correspondió al 80% del P total en 26 de los 43 suelos analizados. El P soluble y lábil (PR+PiL+PoL) fue menor al 10 % en 35 de los 43 suelos. En 32 de los suelos se encontró que la mitad del P total esta en forma no disponible (PiO+PoO+PiRC)
- El P disponible determinado por Bray y Mehlich III y la fracción inorgánica de P extraída con bicarbonato de sodio se correlacionaron ( $p < 0,05$ ) con el contenido de P en la planta de arroz.
- En todas las muestras de grano, analizadas, se encontraron concentraciones de Cd por debajo el límite máximo permisible de  $0,4 \text{ mg.kg}^{-1}$ , establecido por FAO/OMS (2007).
- La información obtenida muestra que la fertilización continua con fosfatos, por períodos de tiempo entre 5 y 50 años no ha tenido un impacto significativo sobre los niveles de Cd en la planta de arroz.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abdu, N. 2006. Soil-phosphorus extraction methodologies: A review. *African Journal of Agricultural Research*, 1:159-161. Disponible en: <http://www.academicjournals.org/AJAR>.
- Adams, M. 1996. Determinación de los Procesos Asociados a la Contaminación con Cadmio en la Región Centro Norte Costera de Venezuela. Universidad Central de Venezuela. Instituto de Edafología. Facultad de Agronomía. Maracay.
- Alamgir, M., Marschner, P. y McNeill A. 2010. Changes in soil P pools during legume residue decomposition. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. Brisbane, Australia. Published on DVD.
- Al-Faiyz Y., El-Garawany M., Assubaje F. y Al-Eed M. 2007. Impact of phosphate fertilizer on cadmium accumulation in soil and vegetable crops. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 78:358-362.
- Alloway, B. 1995. Heavy metals in soils. Blackie. London, UK.
- Álvarez L. 1997. Producción de arroz en los llanos occidentales de Venezuela. Ediciones de la Universidad Ezequiel Zamora, Vicerrectorado de Planificación y Desarrollo Social, Barinas. pp79.
- Álvarez F., Eneidi A., Abreu C., Muraoka T. y Trevizam A. 2008. Fitodisponibilidad de Cd en suelos de diferente pH tratado con lodo albañal estimado por método isotópico y extracción química. *Quim. Nova.* 31(5): 1020-1026.
- Arriechi E. y Ramírez R. 1997. Soil test for available zinc in acid soils of Venezuela. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 28(17 & 18):1471-1480.
- Arroz. 2003. Área: Producción vegetal. Manuales para la producción agropecuaria. Editorial Trillas, México. pp 23.
- Baber, S., Walker J. y Vasey E. 1963. Mechanisms for the movement of plant nutrients from the soil and fertilizer to the plant root. *J. Agr. Food Chem.* 11:203-207.
- Babich H. y Stotzky G. 1978. Effects of cadmium on the biota: Influence of Environmental factors. *Advances in Applied Microbiology.* 23: 55-117.
- Barnhisel, R. y Bertsch P. (Comp.). 1982. *Aluminum. Methods Of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties.* Second edition. Number 9 (part 1).USA.

- Baker, D. y Amacher, M. 1982. (Comp.). Nickel, Copper, Zinc and Cadmium. Methods Of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Second edition. Number 9 (part 1).USA.
- Beck, M. y Sanchez, P. 1994. Soil Phosphorus Fraction Dynamics During 18 Years of Cultivation on a Typic Paleult. Soil Sci. 34: 1424-1431.
- Bernie,r R. 1999. Análisis de suelos. Metodología e interpretaciones. Disponible en <http://www.inia.cl/medios/biblioteca/serieactas/NR25011.pdf> [Consulta: 2012, Julio, 28].
- Boletín Oficial Español (B.O.E.) Número. 262. Real Decreto 1310/1990. [Documento en línea].Disponible:<http://www.boe.es/boe/dias/1990/11/01/pdfs/A32339-32340.pdf>. [Consulta: 2012, Junio, 20].
- Bonomelli, C., Bonilla, C. y Valenzuela, A. 2003. Efecto de la fertilización fosforada sobre el contenido de cadmio en cuatro suelos de Chile. Pesq. Agropc. Bras., Brasilia 38 (10): 1179-1186.
- Boschetti, N., Quintero, C., Benavidez, R. y Giuffre, L. 2003. Cuantificación de las fracciones orgánicas e inorgánicas de fósforo en suelos de la Mesopotamia Argentina. Ciencia del Suelo 21 (1):1-8.
- Bouyoucos, G. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. Agron. J. 54: 464-465.
- Brady, N. 1974. The nature and properties of soil. 8<sup>th</sup> Edition. Macmillan publishing Co., New York. pp 639
- Bray, R. y Kurtz, L. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. Soil Sci. 59: 39-45.
- Bravo, S. 2000. Aspectos básicos de química de suelos. Ediciones de la Universidad Ezequiel Zamora, colección ciencia y tecnología. Barinas. pp. 119-130.
- Cabalceta, G. y Cordero, A. 1994. Niveles críticos de fósforo en ultisoles, inceptisoles, vertisoles y andisoles de Costa Rica. Agronomía Costarricense, 18(2): 147-161.

- Cabalceta, G. 1995. Correlación de soluciones extractoras de fósforo en suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 19(1): 29-37
- Cámara, C., Fernández, P., Martín, A., Pérez, C. y Vidal, M. 2004. Toma y Tratamiento de Muestras. Editorial Síntesis. pág. 46.
- Casanova, E. 2005. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Central de Venezuela. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, segunda edición. Caracas.
- Carneiro, L., Vilela de Resende, A., Furtini, A., Lopes, J., Curi, N., Pereira, T. y Ribeiro do Valle, L. 2011. Fracos de fósforo no solo em resposta á adubacao fosfatada em um latossolo com diferentes históricos de uso. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:483-491.
- Cardozo, V., Meurer, E., Pereira, F., Carvalho, S. y Dos Santos, O. 2008. Biodisponibilidade de cádmio em fertilizantes fosfatados. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:2871-2875.
- Chang, S. y Jackson, M. 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.*, 84:133-144.
- Comerma, J. y Paredes, R. 1978. Principales limitaciones y potencial agrícola de las Tierras en Venezuela. *Agronomía Tropical* 28: 71-85.
- Cotton, F. y Wilkinson, G. 2001. *Química Inorgánica Avanzada*. Limusa. Novena edición. pp 715-720. México
- Cross, A. y Schlesinger, W. 1995. A Literature Review and Evaluation of the Hedley Fractionation: Applications to the Biogeochemical Cycle of Soil Phosphorus in Natural Ecosystems. *Geoderma*. 64: 197-214.
- Dobermann, A. y Fairhurst, T. 2000. Rice: Nutrient disorders & nutrient management. Potash and Phosphate Institute and International Rice Research Institute. Disponible en <http://books.google.co.ve/books?id=V-kJxfFhkaUC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false> [Consulta: 2012, Octubre 4].

- Díaz, A., Arroquie, A. y Sarquis, P. 2005. Estudio de niveles de cadmio en perfiles de suelo de la localidad de Villa Nueva. *Minería y Geología*. 21 (1). Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/2235/223516048002.pdf>. [Consulta: 2012, agosto 29].
- [Dunbar, K. McLaughlin, M. y Reid, R. 2003. The uptake and partitioning of cadmium in two cultivars of potato \(\*Solanum tuberosum\* L.\). \*Journal of Experimental Botany\*. 54 \(381\): 349-354.](#)
- EPA-U.S.1999. Disponible: <http://www.epa.gov/radiation/docs/kdreport/vol2/402-r-99-004b.pdf> [Consultado: 2013, Enero 30].
- Estévez, J., Andrade, L., Marcet, P. y Montero, M. 1998. Influencia de las propiedades del suelo en la fijación y movilidad de Zn y Cd. *Edafología*. 5: 9-27.
- FAO/OMS. 2007. Norma General para los Contaminantes y las Toxinas presentes en los Alimentos: CODEX STAN 193. [Documento en línea]. Disponible:[http://www.codexalimentarius.net/web/index\\_es.jsp](http://www.codexalimentarius.net/web/index_es.jsp). [Consultado: 2008, Noviembre 17].
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2010. Estadística de producción. [Documento en línea]. Disponible: <http://faostat.fao.org/site/336/default.aspx>. [Consultado: 2010, Julio 17].
- Fabre, G., Vilasante F., Ortega, A. y Puig, H. 2006. Phosphorus content in five representative landscape units of the Lomas de Arequipa (Atacama desert-Peru). *Catena*. 65:80-86.
- Fageira, N. y Santos, A. 2008. Lowland rice response to thermophosphate fertilization. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 39: 873–889
- Fassberder, H. y Bornemisza, E. 1987. Química de suelos con énfasis en América Latina. IICA, San José, Costa rica, pp 420.
- Fernández, C. Mendoza, R. y Vázquez, S. 2006. Fracciones de fósforo en suelos de corrientes con producción citrícola, arrocería y pastoril. *C.I. Suelo*, 24 (2): 161-168.

- Fernández, C. y Mendoza, R. 2008. Evaluación del fósforo disponible mediante tres métodos en distintos suelos y manejos productivos. *C.I. Suelo*, 26 (1): 13-27.
- Fernández, S. y Turrión, M. 2011. Fraccionamiento secuencial de fósforo en el suelo. Comparación de dos métodos. *Venesuelos*.19:5-11.
- Fertilizando. 2011. [Documento en línea.] Disponible en: <http://www.fertilizando.com/articulos/Movilidad%20del%20Fosforo%20en%20el%20Suelo.asp>. [Consultado: 2011, mayo 09].
- Frossard, E., Stewart, J., Arnaud, R., 1989. Distribution and mobility of phosphorus in grassland and forest soils of Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.*, 69: 401–416.
- Fuentes, J. 1999. *El suelo y los fertilizantes*, Ediciones Mundi-Prensa, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, 5ª edición, 126-133.
- Fuhrman J., Zhang, H., Schroder, J., Davis, R. y Payton, M. 2005. Water-Soluble Phosphorus as Affected by Soil to Extractant Ratios, Extraction Times, and Electrolyt. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36: 925–935.
- García, I. y Dorronsoro, C. 2004. Contaminación por metales pesados. URL: <http://edafología.ugr.es/Conta/Tema15/html>. [Consultado: 2010, Enero 17]
- García-Miragaya, J. y Page, A. 1978. Sorption of trace quantities of cadmium by soils different chemical and mineralogical composition. *Water, air and soil pollution*, 57-58: 479-488.
- Gilabert, J., López I. y Pérez R. 1990. *Manual de métodos y procedimientos de referencia. (Análisis de Suelos para Diagnóstico de Fertilidad)*. Versión preliminar. Maracay, Ven. FONAIAP. Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. 164 p.
- González, R., Avilan L., León, C., Chirinos, A., De Brito, J. y McCants, C. 1974. Modalidades de la relación “Análisis de P asimilable” respuesta al P observados en invernadero con algunos suelos de Yaracuy. *Agronomía Tropical* 24:55-85.



- Grant, C. 2011. Influence of phosphate fertilizer on cadmium in agricultural soils and crops. *Pedologist*, 143-155. [Documento en línea]. Disponible: [http://pedology.ac.affrc.go.jp/special/SI54\\_3/sepPDF/01\\_Grant.pdf](http://pedology.ac.affrc.go.jp/special/SI54_3/sepPDF/01_Grant.pdf) [Consulta: 2012, noviembre, 2012].
- Guía de protección ambiental. Tomo III. Catálogo de estándares ambientales 1995. Publicado por: Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ). Traducido por: A. Schwender, Servicios lingüísticos de la GTZ. [Documento en línea]. Disponible: <http://ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/ENV/envsp/Vol314e.htm> [Consulta: 2012, Junio, 20].
- Guo, F. y Yost, R. 1998. Partitioning Soil Phosphorus into three Discrete Pools of Differing Availability. *Soil Science*. 163 (10): 822-833.
- Guo, F., Yost, R., Hue, N., Evensen, C. y Silva, J. 2000. Changes in phosphorus fractions in soil under intensive plant growth. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 64:1681-1689.
- Havlin, J., Beaton, J., Tisdale, S., y Nelson, W. 1999. *Soil Fertility and Fertilizers. An Introduction to nutrient management*. Prentice Hall. Sixth edition. Pp 154-155.
- He, Q. y Singh, B. 1994. Crop uptake of cadmium from phosphorus fertilizers: I. Yield and cadmium content. *Water, Air, & Soil Pollution*. 73 (3-4):251-265.
- Heanes, D. 1984. Determination of total organic-C in soil by an improved chromic acid digestion and spectrophotometric procedure. *Soils Science Plant Analysis*, 15:1191-1213.
- Hedley, M., Stewart, J. y Chauhan, B. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 46: 970-976.
- Hernández, I. y Bautis, M. 2005. Cambios en el contenido de fósforo en el suelo superficial por la conversión de sabanas en pinares. *Bioagro*. 17 (2):69-78.
- Hernández, I. y López, D. 1997. Distribución del fósforo en una sabana de *Trachypogon* de los llanos altos centrales Venezolanos. *Acta biológica Venezolana*. 17 (2): 58-65.

- Herrera, T. 2000. La Contaminación con Cadmio en Suelos Agrícolas. *Venesuelos*. 8(1): 42-47.
- Insuasty, L., Burbano, H. y Menjivar, J., 2008. Dinámica de cadmio en suelos cultivados con papa en Nariño, Colombia. *Acta Agronómica (Palmira)*. 57 (1):51-54.
- Iranzo, M., Cañizares, J., Roca-Perez, L., Sainz-Pardo, I., Mormeneo, S. y Boluda, R. 2000, "Characteristics of rice straw and sewage sludge as composting materials in Valencia (Spain). *Bioresource Technology*, 95:107-112.
- Izquierdo, A. y Ramírez, R. 2000. Determinación de Cadmio en las Plantaciones de Cacao del Estado Miranda y alternativas para Disminuir su Efecto Contaminante. INIA Estación Experimental Miranda – Venezuela- UCV. Facultad de Agronomía.
- Jackson, M. (1958). *Soil Chemical Analysis*. Prentice- Hall, INC, First Printing, pp 134.
- Jianguo, L., Min, Q., Guoliang, C., Jianchang, Y. y Qingsen, Z. 2007. Uptake and translocation of Cd in different rice cultivars and the relation with Cd accumulation in rice grain. *Journal of Hazardous Materials*, 143:443–447.
- Kabata-Pendias, A. y Pendias H., 1984. *Trace Elements in Soils and Plants*. 2ª edición. Boca Ratón, FL, CRC. Press. 112-116.
- Kuo, S. 1996. Phosphorus. In: *Methods of Soil Analysis*. SSSA - ASA. p: 868-919.
- Kuo, S. Huang, B. y Bembenek, R. 2007. Release of cadmium from a triple superphosphate and a phosphate rock in soil. *Soil Science*. 172 (4):257-265
- Krishnamurti, G., Huang, P. y Kozak, L. 1999. Sorption and desorption kinetics of cadmium from soils: Influence of Phosphate. *Soil Science Society of American Journal* 164: 888-898.
- Labrador, J. 1996. La material orgánica en los agrosistemas. Ediciones mundi prensa. 1ª edición, España, pp 31 [Documento en línea]. Disponible: [books.google.com](http://books.google.com) [Consultado: 2012, julio 29].

Lenntech. Diponible  
en: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/p.htm#ixzz1JRetUhnP>. [Consultado  
2011, abril 15].

[Levesque, M. y Schnitzer, M. 1967. Organo-metallic interactions in soils: 6. Preparation and properties of fulvic acid metal phosphates. Soil Science. 103: 183-190](#)

Liu, J., Liang, J., Li, K., Zhang, Z., Yu, B., Lu, X., Yang, J. y Zhu, Q. 2003. Correlations between cadmium and mineral nutrients in absorption and accumulation in various genotypes of rice under cadmium stress. *Chemosphere*. 52:1467–1473.

Liu, J., Qian, M., Cai, G., Yang, J. y Zhub, Q. 2007. Uptake and translocation of Cd in different rice cultivars and the relation with Cd accumulation in rice grain. *Journal of Hazardous Materials*. 143 :443–447

Loeb, R., Lamers, L. y Roelofs, J. 2008. Prediction of phosphorus mobilization in inundated floodplain soils. *Environmental Pollution*. 156 (2):325-331.

López-Piñero A. y García-Navarro A. 2001. Phosphate Fractions and Availability in Vertisols of South-Western Spain. *Soil Science*. 166 (8): 548-556.

López, I. 1977. La Química del fósforo en suelos ácidos. Universidad Central de Venezuela. Ediciones de la Biblioteca Caracas. pp 119.

López, A., Hernández, I. y López, D. 2007. Fractionation of soil phosphorus in organic amended farms located on savanna sandy soil Venezuelan Amazonian. *Biol. Ferti. Soils*. 43:771-777

López, I., Alfonso, N., Gómez, N. Navas, M. y Yáñez, P. 2008. Manual de alternativas de recomendaciones de fertilizantes para cultivos prioritarios en Venezuela. Maracay, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. 380 p. (Serie B, N° 18).

Mann S. Rate A. y Gilkes R. 2002. Cadmium accumulation in agricultural soils Western Australia. *Water, Air & Pollution*. 141(1-4): 281-297.

- Maracara, B. y Niño, R. 2004. Evaluación de la concentración de metales pesados en rocas fosfóricas nacionales e importadas y productos derivados de la agroindustria. Trabajo de grado no publicado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Maracay.
- McBride, M. 1991. Comments on "Adsorption of heavy metals by silicon and aluminum oxide surfaces on clay minerals". *Soil Science Society of America Journal*, 55: 1508 – 1509.
- MacLaughlin, M., Maier, N., Rayment, G., Sparrow, L., Berg, G., McKay, A., Milham, P., Merry R., y Smart, M., 1997. Cadmium in Australia Potato Tubers and Soils. *Journal Environmental Quality*, 26: 1644-1649.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15: 1409–1416.
- Monteiro, A., Pereira, G., Araujo, C. y Oliveira, M. 2006. Bioavailability of cadmium and lead in soil amended with phosphorus fertilizers. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, 63 (4):328-332.
- Murphy, J. y Riley, J. 1962. An modified single method for determination of phosphates in natural waters. *Anal. Chem. Act.*, 27: 31-36.
- Navarro, G. y Navarro, S. 2003. *Química Agrícola*. Ediciones mundi prensa. Segunda edición. España, pp 55-72, 219-247.
- Olsen, R. y Sommers, L. (Comp.). 1982. Phosphorus. *Methods Of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Second edition. Number 9 (part 1).USA. pp. 403-430.
- Ochwoh, V., Claassens, A. y Jager, P. 2005. Chemical Changes of Applied and Native phosphorus During Incubation and Distribution into Different Soil Phosphorus Pools. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36: 535-556.
- Okada, I., Duran, M., Buzzo, M., Dovidauskas, S., Sakuma, A. y ZeneBon, O. 2007. Validacao e aplicacao de metodologia analítica na determinacao de nutrientes inorgânicos em arroz polido. *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, Campinas, 27(3): 492-497

- Páez, O. 2004. El Cultivo del Arroz en Venezuela. INIA (Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas), Serie Manuales de Cultivo INIA N° 1. Maracay. 202 p.
- Palus, J., Rydzynski, K., Dziubaltowska, E., Wyszynska, K., Natarajan, A., y Nilsson, R. 2003. Genotoxic effects of occupational exposure to lead and cadmium. *Mutat. Res.* 540: 19-28.
- Park, S., Cheng, N., Pittman, J., Yoo, K., Park, J., Smith, R. y Hirschi, K. 2005. Increased Calcium levels and prolonged shelf life in tomatoes expressing *Arabidopsis* H<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup> transporters. *Plant Physiology* 39:1194-1206.
- Patrick, W., Khalid, R. 1974. Phosphate release and sorption by soils and sediments: effect of aerobic and anaerobic conditions. *Science*, 186: 53-55.
- Perdomo, M., González, J., Cadavid de Galvis, Y. y García, E. 1983. Los macronutrientes en la nutrición de la planta de arroz. CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical), Serie 04SR-90,06. Cali, Colombia. pp 36.
- Pérez, M. 1995. Comparación de Cuatro Métodos Extractantes de Fósforo Disponible en Suelo Tratados con Fuentes de Fósforo de Diferentes Grados de Solubilidad. *Agronomía Tropical* .45 (4): 507-526.
- Pernía, B., De Sousa, A., Reyes, R. y Castrillo M. 2008. Biomarcadores de contaminación por cadmio en las plantas. *Interciencia*. 33(2): 112-119.
- Petersen, G. y Corey, R. 1966. A modified Chang and Jackson procedure for routine fractionation of inorganic soil phosphates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 30:563-565.
- Pierangeli, M., Guimarães, L., Curi, N., Naves, M., De Lima, J. y Costa, E. 2005. Effect of pH on cadmium adsorption and desorption in Brazilian oxisols. *Revista Brasileira de Ciencia del Suelo*. 29: 523-532.
- Pozo, W., Sanfeliu, T. y Carrera, G. 2011. Metales pesados en humedales de arroz en la cuenca baja del río Guayas. *MASKANA*, 2 (1):17-30. Disponible en: <http://diuc.ucuenca.edu.ec/downloads/InformacionInformation/Contenidos%20de%20la%20Revista%20Journal%20contents/Vol.%202%20N%201%20Julio%202011/m>. [Consultado: 2012, Junio 30].

- Quiñones, A. 1991. Características de fertilidad de los suelos venezolanos vistos a través de los resúmenes de análisis rutinarios. IV. Disponibilidad de micronutrientes (cobre, zinc, hierro y manganeso) en la región oriental. FONAIAP - Estación Experimental Anzoátegui. 24 p. (Serie C. N° 35).
- Ramírez, R., Rodríguez, T., Millán, A., Hernández, C., Guzmán, E., Tenias, I. y Chirinos, A. 1987. Relación entre el fósforo disponible del suelo con el requerimiento y respuesta del sorgo a la fertilización con fósforo. *Agronomía Tropical*. 37:85-98.
- Ramírez, R., Beg, M., Colmenares, O., Meléndez, E., Marbal, P., Blanco, F., Guzmán, E., Hernández, C. y Chirinos, A. 1988. Relación entre la respuesta del maíz a la aplicación de fosforo y el P asimilable del suelo. *Agronomía Tropical*. 38:33-46.
- Ramírez, R. 1989. Relación entre el fósforo del suelo con la respuesta de la yuca a la fertilización fosfatada. *Agronomía Tropical*. 39 (1-3):115-130.
- Ramírez, R. y Morales, D. 1989. Comparación de cuatro métodos de análisis del fósforo del suelo para estimar el requerimiento de  $P_2O_5$  por el tomate (*Lycopersion esculentum*). *Agronomía Tropical*. 39 (1-3): 79-94.
- Ramírez, R., Tenias, J., De Silva, L., Rodríguez, T. y Chirinos, A. 1989. Comparación de cuatro métodos de análisis del con la respuesta del maní a la fertilización con fósforo. *Agronomía Tropical*. 39 (1-3): 5-21.
- Ramírez, R., Morales, D. y Álvarez, E. 1990. Calibración de cuatro métodos de análisis del fósforo del suelo para predecir la respuesta del melón (*Cucumis melón*) a la fertilización fosfatada. *Agronomía Tropical*. 40: 1-3.
- Reddy, K., Kadlec, R., Flaig, E. y Gale, P. 1999. Phosphorus Retention in Streams and Wetlands: A Review, *Critical Reviews in Environmental. Science and Technology*, 29: 1, 83- 146.
- Rhoades, J. (Comp.). 1982. Cation Exchange Capacity. *Methods Of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Second edition. Number 9 (part 1). USA.
- Rico, G. 1997. Optimización de los requerimientos en arroz. En: I jornadas de análisis para el mejoramiento continuo del arroz. FUNDARROZ/DANAC.
- Richards, I., Clayton, C. y Reeve, A. 1998. Effects long-term fertilizer phosphorus application on soil and crop phosphorus and cadmium contents. *The journal of agricultural science*. 131(2): 187-195.

- Rivero, C. 1999. *Materia orgánica del suelo*. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Alcance 57.pp 211
- Rivillo, A. 2006. [Disponible en CD]. *La Química de los Suelos Inundables en Venezuela*. En conmemoración al L aniversario del Sistema de Riego Río Guárico. ID 1001712602.
- Rodríguez, T., Omir, M., Almeida, F. y Machado, I. 2007. Algodoeiro cultivado em solo tratado com calcário, lodo de esgoto e cádmio. *R.C. Suelo Nutr. Veg.* 7 (1): 74-87.
- Rodríguez, M., Martínez, N., Romero, M. Del Río, L. y Sandalio, L. 2008. Toxicidad del Cadmio en Plantas. *Ecosistemas.* 17 (3). [Documento en línea]. Disponible: <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=558> [Consultado: 2009, Marzo 14].
- Rojas, C. 1976. Selección de métodos para la evaluación de fósforo disponible en suelos arroceros. *Agricultura Técnica (Chile).* 36:5-12.
- Rothbaum, H., Goguel, R., Johnston, A. y Mattingly, G. 1986. Cadmium Accumulation in Soils from Long-Continued Applications of Superphosphate. *Journal of Soil Science.* 37: 99-107.
- Sahrawat, K. 2005. Fertility and organic matter in submerged rice soils. *Current Science,* 88 (5):735-739.
- Salviano, A., Pereira, G., Araujo, C. y Oliveira, M. 2006. Bioavailability of cadmium and lead in a soil amended with phosphorus fertilizers. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.).* 63 (4): 328-332.
- Sánchez, P., Cuoto W., y Buol, S. 1982. The fertility capability soil classification system. Interpretation, applicability and modification. *Geoderma* (27): 283-309.
- Sánchez, N., Subero, N. y Rivero, C. 2011. Determinación de la adsorción de cadmio mediante isotermas de adsorción en suelos agrícolas venezolanos. *Acta Agronómica.* 60 (2): 190-197.
- Sanzano A. Disponible en: <http://www.edafo.com.ar/Descargas/Cartillas/Fosforo%20del%20Suelo.pdf>. [Consulado, mayo 9, 2011].

- Scalenghe, R., Edwards, A., Ajmone, F. y Barberis, E. 2002. The effect of reducing conditions on the solubility of phosphorus in a diverse range of European agricultural soils. *European J. Soil. Sci.* 53(3): 439-448.
- Scheidegger, A., Lamble, G. y Sparks, D. 1996. Spectroscopic evidence for the formation of mixed-cationhydroxide phases upon metal sorption on caliz and aluminum oxides. *J. Colloid Interface Sci.*, 62: 2233-2245.
- Schmidt, J., Buol, S. y Kamprath, E. 1996. Soil Phosphorus Dynamics During Seventeen Years of Continuous Cultivation: Fractionation Analyses. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 60: 1168-1172.
- Sharpley, A. y Smith, S. 1983. The Distribution of Phosphorus Forms in Virgin and Cultivated Soils and Potential Erosion Losses. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 47: 581-586.
- Sharpley, A. y Smith, S. 1985. Fractionation of inorganic and organic phosphorus in virgin and cultivated soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 49: 127-130.
- Sharpley, A., Singh, U., Uehara, G. y Kimble J. 1989. Modeling Soil and Plant Phosphorus Dynamics in Calcareous and Highly Weathered Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:153-158.
- Singh, B. 1994. Trace element availability to plant in agriculture soil with special emphasis on fertilizer input. *Environ. Rev.* 2:133-146.
- Smolders, E., Bran,s K., Földi ,A., y Merekr, R. 1999. Cadmium Fixation in Soils Measured By Isoropic Dilution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 78-85.
- Snyder, C. y Slaton, N. Efecto de inundación y secado del suelo en las reacciones del fósforo. *Informaciones agronómicas* N° 51. Disponible en línea: [http://www.ipni.net/ppiweb/iaecu.nsf/\\$webindex/D45F9F5AE92C0CFB05256DD40074B651/\\$file/Efectos+de+la+Inundaci%C3%B3n+y+Secado+del+Suelo+en+las+Reacciones+del+F%C3%B3sforo.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/iaecu.nsf/$webindex/D45F9F5AE92C0CFB05256DD40074B651/$file/Efectos+de+la+Inundaci%C3%B3n+y+Secado+del+Suelo+en+las+Reacciones+del+F%C3%B3sforo.pdf). [Consultado: 2011, 25 abril]
- Solomon, D. y Lehmann, J. 2000. Loss of phosphorus from soil in semi-arid northern Tanzania as a result of cropping evidence from sequential extraction and <sup>31</sup>P-NMR spectroscopy. *European Journal of Soil Science*, 51: 699-708.

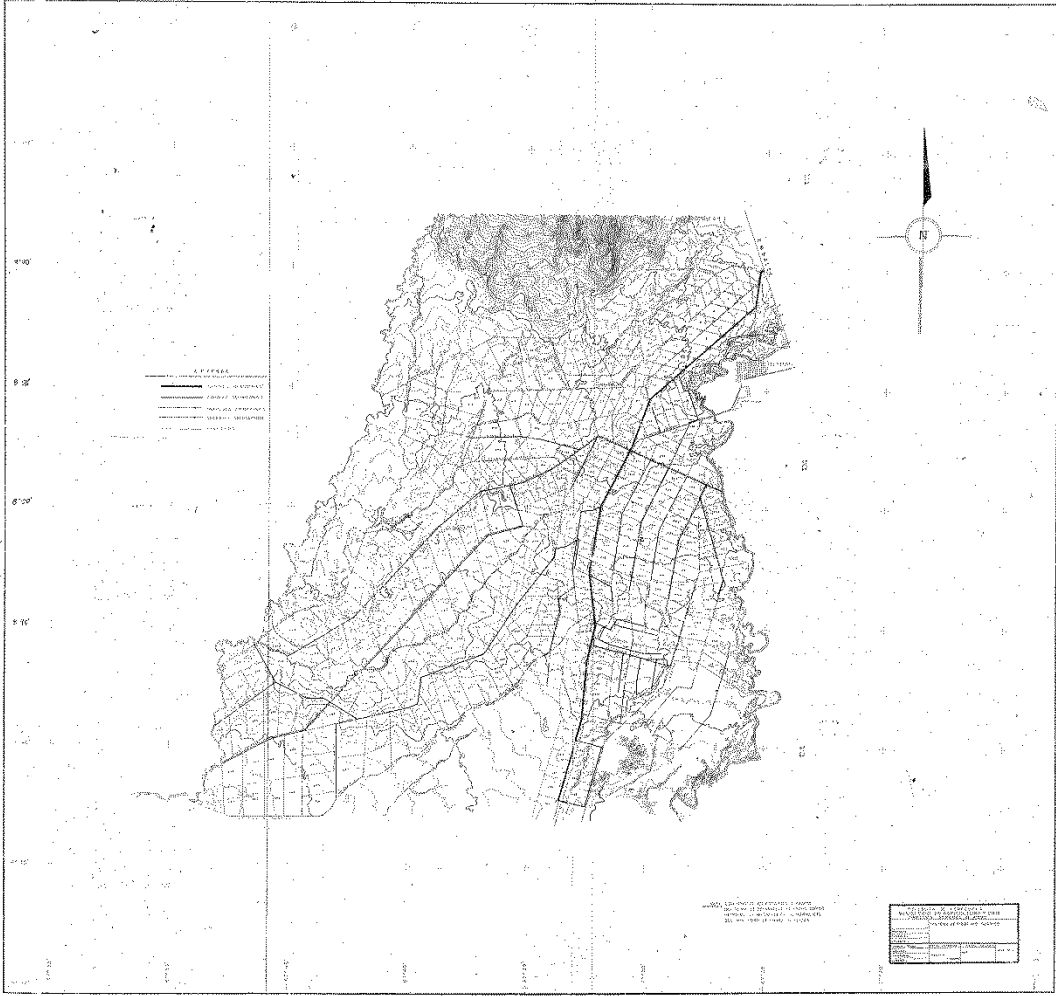


- Solórzano, Pedro. 1997. Fertilidad de suelos, su manejo en la producción agrícola. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Alcance 51. pp 207
- Solórzano, Pedro. 2003. Crecimiento y nutrición del arroz (*Oryza sativa* L.) en Venezuela. Informaciones agronómicas N° 51. pp1. Disponible en línea: [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/DE664B1F01F30A61852579A300778955/\\$FILE/Crecimiento%20y%20Nutricion%20del%20Arroz%20\(Oryza%20sativa%20L.\)%20en%20Venezuela](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/DE664B1F01F30A61852579A300778955/$FILE/Crecimiento%20y%20Nutricion%20del%20Arroz%20(Oryza%20sativa%20L.)%20en%20Venezuela). [Consultado: 2012, 29 agosto]
- Sotelo, E., Gutiérrez, M., Ortiz, C., Cruz, G. y Segura, M. 2007. Delimitación de vertisoles a través de la identificación de sus firmas espectrales con el uso de imágenes Landsat TM. *TERRA Latinoamericana*, 25 ( 3): 223-230.
- Sotomayor, D., Martínez, G., Mylavarapu, R., Santana, O. y Guzmán, J. 2004. Phosphorus Soil Tests for Environmental Assessment in Subtropical Soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35 (11-12):1485-1503.
- Spiegel, M. 1991. Estadística. McGraw-Hill. Serie Schaum. Segunda edición. España, pp 556.
- Stevenson, F. 1986. Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. A Wiley-Inter-Science publication. John Wiley and son, N. York. 380 p
- Sun, D., Waters, J. y Mawhinney, T. 2000. Determination of Thirteen Common Elements in Food Samples by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry: Comparison of Five Digestion Methods. *Journal of AOAC international*. 83 (5):1218-1224.
- Suñer, L., Galanti, J., Rosell, R. y Chamadoira, M. 2000. Cambios en el contenido de las formas de fósforo en suelos de la región semiárida de pampeana cultivados con trigo (*Triticum aestivum*). *Revista de la Facultad de Agronomía, La plata*, 104 (2): 113-119.
- Tack, F., Van Rast, E., Lievens, C., Vandenberghe, R. 2006. Soil solution Cd, Cu and Zn concentrations as affected by short-time drying or wetting: The role of hydrous oxides of Fe and Mn. *Geoderma* 137: 83-89.
- Takahashi, S. y Anwar, M. 2007. Wheat grain yield, phosphorus uptake and soil phosphorus fraction after years of annual fertilizer application to an Andosol. *Field Crops Research*. 101: 160-171.

- Tan, K. 1998. Principles of soils chemistry. Marcel Dekker INC, Third edition. USA
- Tisdale, S. y Nelson, L. 1991. Fertilidad de los suelos y fertilizantes. 7ma edición. Limusa, Mexico. 212 p.
- Tiessen, H., Stewart, J. y Cole, C. 1984. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Sci. Soc. Am J.*, 48: 853-858.
- Tiessen, H. y Moir, J. 1993. Characterization of Available P by Sequential Extraction. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Chapter 10. 75-86.
- Turner, B. 2006. Organic phosphorus in Madagascan rice soils. *Geoderma*, 136: 279–288.
- Turrión, M., Gallardo, J., Haumaier, L., González, M. y Zech, W. 2001. <sup>31</sup>P NMR characterization of phosphorus fractions in natural and fertilized forest soils. *Ann For Sci.*, 58:89–98.
- Turrión, M., López, O., Lafuente, F., Mulas, R., Ruipérez, C. y Puyo, A. 2007. Soil phosphorus forms as quality indicators of soils under different vegetation covers. *Science of the Total Environment*, 378: 195–198.
- Useche, R., Rodríguez, A. y Marcial, J. 1976. Dos formas de aplicación de N, P y K en arroz de riego sembrado en un Vertisol. *Agronomía Tropical*, 26 (5) 383-391.
- Vieira da Cunha, K., Araujo do Nascimento, W., De Mendonca, R., De Aguiar, A. y Da Silva, A. 2008. Disponibilidade, acúmulo e toxidez de cádmio e zinco em milho cultivado em solo contaminado. *R. Bras. Ci. Solo*, 32 (3):1319-1328.
- Wang, J., Harrell, D., Henderson, R. 2004. Comparison of soil-test extractants for phosphorus, potassium, calcium, sodium, zinc, copper, manganese and iron in Louisiana soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 35, 145-160.
- Weisberg, M., Joseph, P., Hale, B. y Beyersmann, D. 2003. Molecular and cellular mechanisms of cadmium carcinogenesis. *Toxicology* 192: 95-110.
- Westin, F. y Brito, J. 1969. Phosphorus Fractions of Some Venezuelan Soils as Related to Their Stage of Weathering. *Soil Science*. 107 (3): 194-202.
- Williams, J., Syres, J. y Walker, T. 1967. Fractionation of soil inorganic phosphate by a modification of Chang and Jackson procedure. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 31:736-739.

- Willard, H., Merrit, J. y Dean, J. 1978. Métodos instrumentales de análisis químico. Editorial Continental, S.A., México.
- Wolf, B., Benton, J. y Mills, H. 1991. Plant Analysis Handbook. Micro-Macro Publishing Inc. Georgia. USA.
- Yu, H., Wang, J., Fang, W., Yuan, J. y Yang, Z. 2006. Cadmium accumulation in different rice cultivars and screening for pollution-safe cultivars of rice. *Science of the Total Environment*. 370: 302-309.
- Zalba, P., Bravo, O., Amiotti, N. y Peinemann, N. 2002. Métodos alternativos para determinar las disponibilidades de fosforo en suelos agrícolas. *Ciencia del Suelo*. 20 (1): 50-53.
- Zeng, F., Mao, Y., Cheng, W., Wu, F. y Zhang, G. 2008. Genotypic and environmental variation in chromium, cadmium and lead concentrations in rice. *Environmental Pollution*. 153: 309- 314.
- Zhang, T. y Mackenzie, A. 1997. Changes of Soil Phosphorous Fractions Under Long-Term Corn Monoculture. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 61: 485-493.
- Zubillaga, M. y Lavado, R. 2002. Fertilización fosfatada prolongada y contenido de elementos traza en un Argiudol típico de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo* 20 (2): 110-113

## **Anexos**



## ANEXO 2

## ENCUESTAS

N° de Muestra	N° de Parcela	Nombre del Propietario	Variiedad	Fertilización	Tiempo fertilizando	N° de ciclos al año	Rendimiento Kg/Ha
1	199	Rafael Urdaneta	Fedearroz 50	1°{120 Kg/Ha de fosfato especial 16 42 00 2°{110 Kg/Ha NH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub> y 150 Kg/Ha Urea 3°{110 Kg/Ha Urea 4°{110 Kg/Ha Urea	13 años	2	8022 Kg/Ha
2	508	Edgar Herrera	Colombia 21				
3	178	Demetrio Frailes	Venezuela 21	200 Kg/Ha 10 20 20 400 Kg/Ha Urea	16.5 años	2	4500 Kg/Ha
4	210	Hernan Barbella	Fedearroz 50	550 Kg/Ha 10 20 20 250 Kg/Ha Urea	32 años	1	7000 Kg/Ha
5	217	Ildefonso Rodriguez					
6	152	Luis Ceballos	Fedearroz 50	1°{250 Kg/Ha 10 20 20 2°{180 Kg/Ha Urea 2°{200 Kg/Ha Urea	20 años	2	6000 Kg/Ha
7	162	Domingo Rico	Venezuela 21	400 Kg/Ha 10 20 20 200 Kg/Ha Urea	50 años	2	6500 Kg/Ha
8	03 (Carret. A)	Efraín Alvarado	Venezuela 21	300 Kg/Ha 10 20 20 100 Kg/Ha KCl 350 Kg/Ha Urea	9 años	2	6800 Kg/Ha
9	206	Dubin González	Venezuela 21	1°{250 Kg/Ha 10 20 20 y 100 Kg/Ha Urea 2°{150 Kg/Ha Urea 3°{150 Kg/Ha Urea	45 años	2	8000 Kg/Ha
10	Fdo Caracolito. Las Bonitas	Luis Rodríguez	Fedearroz 50	250 Kg/Ha 10 20 20 50 Kg/Ha de Urea	10 años	1	7500 Kg/Ha

11	211	Florencio Martinez	Colombia 21		40 años	2	
12	Fdo. Sta. Lucia Pte. Aldos	Vito Croce	Cimarron	1°{ 250 Kg/Ha 10 20 20 2°{ 100 Kg/Ha Urea 50 Kg/Ha KCl y 50 Kg/Ha P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		2	
13	Los Corrales	Victor Ochoa	Cimarron	300 Kg/Ha 10 20 20 300Kg/Ha Urea 100Kg/Ha Sulfato amonio 50Kg/Ha KCl	10 años	1	7000 Kg/Ha
14	512	Francisco Moreno	Colombia 21	200 Kg/Ha 10;20;20 300 Kg/Ha Urea	30 años	2	7000 Kg/Ha
15	516	Juan de la Cruz Acevedo	Venezuela 21	250 Kg/Ha 10;20;20 300 Kg/Ha Urea 100 Kg/Ha NH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub>	20 años	2	6000 Kg/Ha
16	Fca el Cañito lote1 (Sector la Candelaria)	Salvador Melita	I.S.H. Colombia 21	200 Kg/Ha 10;20;20 200 Kg/Ha KCL 300 Kg/Ha Urea 50 Kg/Ha NH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub>	5 años	2	8000 Kg/Ha
17	Fdo.la Reina (Sector la Candelaria)	Crucita de Melita	Venezuela 21	200 Kg/Ha 10;20;20 100 Kg/Ha KCL 300 Kg/Ha Urea 50 Kg/Ha NH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub>	5 años	2	8000 Kg/Ha
18	75	Bruno Bucciarelli	Colombia 21	1° (100 Kg/Ha Urea ; 50 Kg/Ha KCL ) 2° (75 Kg/Ha Urea ;50 Kg/Ha KCL) 3° (75 Kg/Ha Urea ;75 Kg/Ha NH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub> )	30 años	2	8000 Kg/Ha
19	84	Antonio Rotundo	Colombia 21	1°(100 Kg/Ha Urea ; 100Kg/Ha 10;20;20) 2°(75 Kg/Ha KCL ;75	20 años	2	8000 Kg/Ha

				Kg/Ha Urea) 3°(50 Kg/Ha 10;20;20 50 Kg/Ha NH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub> )			
20	85	Benigno Reveron	Cimarron				
21	51	Jose Gilberto Rodriguez	Venezuela 21		40 años	2	7500 Kg/Ha
22	4	Amato Bucciarelli	Cimarron		48 años	1	7000 Kg/Ha
23	539 Sector Uverito	Milagros Matute	Cimarron	1°(300Kg/Ha 10;20;20 2°(150 Kg/Ha Urea 3°(100 Kg/Ha Urea ; 100Kg/Ha NH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub> )	50 años	2	6000 Kg/Ha
24	565 Lote D Sector Uverote	Leonor Hernández	Coprocen (Cimarrón mejorado).		25 años	1 verano	4000 Kg/Ha
25	565 Sector Uverote	Pedro Pablo Jiménez	Cimarrón	1° (200 Kg/Ha 10;20;20) 2° (150 Kg/Ha Urea) 3° (150 Kg/Ha Urea)	36 años	1	6500 Kg/Ha
26	551 Sector Uverote	José Gregorio Galíndez	Cimarron	1° (100 Kg/Ha 10;20;20) 2° (150 Kg/Ha 10;20;20 : 50 Kg/Ha Urea) 3° (150 Kg/Ha Urea) 4° (50 Kg/Ha Urea : 50Kg/Ha NH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub> )	40 años	1	6000 Kg/Ha
27	552 Sector Uverote	Ali Rafael Mendez	Venezuela 21		30 años	1	8000 Kg/Ha
28	566 Lote D Sector Uverote	Cesar Leonardo Morales	Colombia 21	1° (150 Kg/Ha 10;20;20 50 Kg/Ha Urea) 2° (150 Kg/Ha Urea) 3° (125 Kg/Ha Urea)	40 años	2	7000Kg/Ha
29	566 Lote A	Luis Enrique Ladera	D-Sativa	1° (250 Kg/Ha 17;20;18) 2° (150 Kg/Ha Urea)	35 años	2	7000 Kg/Ha



				3° (150 Kg/Ha Urea)			
30	548 Lote 1	Milagros Ledesma de Garcia	Cimarrona		45 años	2	6600 Kg/Ha
31	Sector Herrera	Cooperativa Palo Verde	Sativa	1° (100 Kg/Ha 10;20;20 : 100 Kg/Ha Urea 50 Kg/Ha KCL) 2° (50Kg/Ha 10;20;20 50Kg/Ha Urea 50 Kg/Ha NH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub> ) 3°	5 años	2	2000 Kg/Ha
32	204	Carlos Romero	Fedearroz 50	250 Kg/Ha 10;20;20 100 Kg/Ha KCL 185 Kg/Ha Urea 100 Kg/Ha NH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub>	51 años	2	6000 Kg/Ha
33	174	Miguel Aguilera	Cimarrona	1° (300 Kg/Ha 10;20;20) 2° (150 Kg/Ha Urea 50 Kg/Ha KCL) 3° (100 Kg/Ha Urea 50 Kg/Ha NH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub> )	51 años	2	7000 Kg/Ha
34	235	Ruben Dario Carpio	Fedearroz 50	1° (300 Kg/Ha 10;20;10 50 Kg/Ha Urea) 2° (50 Kg/Ha 10;20;20 150 Kg/Ha Urea) 3° (50 Kg/Ha KCL	30 años	2	8500 Kg/Ha
35	222	Juan Guerrero	Venezuela 21				
36	86	Edgar Braun	D-Oriza				
37	Lote 6C Fca Santa Monica	Bernabé Diaz Rafael flores	Colombia 21				
38	Lote 1-B1	Eduardo Ablaán	Colombia 21				

	Fca Santa Maria Sector Santa Monica						
39	592-B	Zuleida Villavicencio	Colombia 21				
40	544-B	Pedro Peña	D-Sativa				
41	L3-63 Lote 74	Francisco Meza	Cimarron				
42	165 Sector Uverote	Enzo Ricardi	Fedearroz 50				
43	149	Carlos Ortegano					
44	150	Heriberto Cairo					
45	154	Sucesión Victorio Seguro					
46	156	Manuel Cobo					
47	130	Jane García					
48	209	José Guerra					
49	566 Sector Uverote	Carmen Mejias de Ladera	D-Sativa	1° (250 Kg/Ha 10:20:10 2° (100 Kg/Ha 10:20:20 50 Kg/Ha Urea) 3° (150 Kg/Ha Urea)	30 años	1	6500 Kg/Ha

## ANEXO 3

## FRACCIONES INORGÁNICAS

## Grupos por pH

**primer grupo pH 3,52 hasta 5,02**

Muestra	pH (1:2,5)	%PiR	%PiL	%PiML	%PiLL	%PiO	%PiRC
sue-34	3,53	0,23	6,22	22,3	4,26	35,85	31,13
sue-35	4,15	0,48	9,57	28,65	14,9	24,96	21,43
sue-21	4,91	0,31	3,31	19,45	7,82	38,55	30,57
sue-37	4,91	0,67	2,94	21,05	19,06	23,11	33,16
sue-27	4,98	0,3	4,81	19,63	7,41	26,06	41,79
Muestra promedio	pH (1:2,5)	PiR	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC
		0,398	5,37	22,216	10,69	29,706	31,616

**segundo grupo pH 5,02 hasta 5,52**

Muestra	pH (1:2,5)	%PiR	%PiL	%PiML	%PiLL	%PiO	%PiRC
sue-24	5,03	1,06	8,91	21,45	9,14	25,27	34,17
sue-33	5,03	0,2	4,18	17,91	6,3	48,53	22,88
sue-30	5,06	0,45	6,37	28,7	15,66	31,75	17,06
sue-31	5,13	0,29	5,25	23,79	1,8	27,42	41,46
sue-49	5,14	0,16	2,25	12,74	6,5	49,57	28,79
sue-22	5,19	0,3	1,91	21,8	4,87	38,46	32,65
sue-02	5,20	0,43	10,29	23,12	14,22	25,62	26,31
sue-03	5,24	0,12	3,01	36,07	6,77	24,93	29,09
sue-47	5,28	0,34	6,06	20,98	18,62	26,48	27,52
sue-26	5,30	0,3	4,22	19,45	11,58	27,28	37,17
sue-46	5,30	0,39	6,18	17,39	10,74	26,25	39,05
sue-09	5,38	0,11	2,13	15,94	13,73	41,69	26,39
sue-01	5,43	0,15	4,6	24,87	16,03	36,44	17,91
sue-44	5,46	0,11	2,94	14,76	10,49	44,55	27,15
sue-41	5,48	0,09	1,76	14,1	9,21	37,64	37,19
sue-13	5,50	0,17	1,01	5,07	2,73	55,71	35,3
sue-04	5,51	0,2	2,28	18,17	14,02	40,86	24,47
sue-10	5,51	0,18	2,87	14,97	6,99	45,81	29,18
sue-19	5,52	0,16	1,39	17,52	6,09	50,28	24,56
Muestra promedio	pH (1:2,5)	PiR	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC
		0,27	4,08	19,41	9,76	37,08	29,38

**tercer grupo pH 5,52 hasta 6,02**

Muestra	pH (1:2,5)	%PiR	%PiL	%PiML	%PiLL	%PiO	%PiRC
sue-23	5,53	0,17	1,3	17,41	11,87	44,06	25,19
sue-36	5,53	0,25	1,55	11,28	4,9	51,66	30,35
sue-43	5,56	0,15	3,54	13,44	6,66	54,16	22,04
sue-40	5,61	0,15	3,13	20,33	1,39	37,92	37,08
sue-20	5,66	0,23	1,38	12,83	4,49	52,69	28,37
sue-28	5,72	0,23	1,46	10,57	8,46	46,21	33,07
sue-38	5,72	0,46	3,44	22,27	21,54	26,35	25,95
sue-17	5,75	0,32	1,65	12,32	6,39	42,17	37,14
sue-11	5,79	0,35	3,72	18,02	9,64	40,4	27,86
sue-45	5,85	0,54	5,98	21,69	21,91	30,17	19,72

sue-18	5,89	0,32	1,66	14,98	6,88	53,69	22,48
sue-16	5,93	0,32	1,61	9,32	7,95	46,71	34,09
sue-29	5,96	0,24	1,25	9,19	4,08	59,36	25,88
sue-06	6,01	0,3	3,69	16,42	20,25	33,8	25,54
Muestra	pH (1:2,5)	PiR	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC
promedio		0,29	2,53	15,01	9,74	44,24	28,20

#### cuarto grupo pH 6,02 hasta 7,02

Muestra	pH (1:2,5)	%PiR	%PiL	%PiML	%PiLL	%PiO	%PiRC
sue-05	6,04	0,18	3,19	11,08	8,32	44,56	32,67
sue-08	6,10	0,21	2,07	13,35	4,9	47,02	32,45
sue-14	6,44	2,48	4,61	22,06	26,41	26,17	18,27
sue-48	6,64	0,62	2,52	16,04	14,9	42,15	23,77
sue-07	6,91	0,37	2,9	9,6	5,61	51,53	29,99
Muestra	pH (1:2,5)	PiR	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC
promedio		0,77	3,06	14,43	12,03	42,29	27,43

#### Grupos por contenido de Ca

##### primer grupo Ca: desde 49 hasta 649 mg.k<sup>-1</sup>

Muestra	Casuelo	%PiR	%PiL	%PiML	%PiLL	%PiO	%PiRC
sue-31	49,63	0,29	5,25	23,79	1,80	27,42	41,46
sue-24	353,85	1,06	8,91	21,45	9,14	25,27	34,17
sue-02	382,24	0,43	10,29	23,12	14,22	25,62	26,31
sue-34	385,78	0,23	6,22	22,30	4,26	35,85	31,13
sue-40	412,44	0,15	3,13	20,33	1,39	37,92	37,08
sue-46	449,15	0,39	6,18	17,39	10,74	26,25	39,05
sue-35	473,02	0,48	9,57	28,65	14,90	24,96	21,43
sue-27	484,69	0,30	4,81	19,63	7,41	26,06	41,79
sue-33	518,12	0,20	4,18	17,91	6,30	48,53	22,88
sue-21	524,71	0,31	3,31	19,45	7,82	38,55	30,57
sue-03	532,95	0,12	3,01	36,07	6,77	24,93	29,09
sue-47	622,90	0,34	6,06	20,98	18,62	26,48	27,52
sue-30	626,30	0,45	6,37	28,70	15,66	31,75	17,06
Muestra	pH (1:2,5)	PiR	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC
promedio		0,37	5,95	23,06	9,16	30,74	30,73

##### segundo grupo Ca: desde 649 hasta 1249 mg.k<sup>-1</sup>

Muestra	Casuelo	%PiR	%PiL	%PiML	%PiLL	%PiO	%PiRC
sue-01	688,78	0,15	4,60	24,87	16,03	36,44	17,91
sue-49	731,81	0,16	2,25	12,74	6,50	49,57	28,79
sue-43	788,36	0,15	3,54	13,44	6,66	54,16	22,04
sue-11	793,83	0,35	3,72	18,02	9,64	40,40	27,86
sue-13	841,69	0,17	1,01	5,07	2,73	55,71	35,30
sue-22	853,59	0,30	1,91	21,80	4,87	38,46	32,65
sue-26	877,82	0,30	4,22	19,45	11,58	27,28	37,17
sue-10	958,55	0,18	2,87	14,97	6,99	45,81	29,18
sue-45	1073,80	0,54	5,98	21,69	21,91	30,17	19,72
sue-20	1117,86	0,23	1,38	12,83	4,49	52,69	28,37
sue-06	1140,29	0,30	3,69	16,42	20,25	33,80	25,54
sue-05	1152,07	0,18	3,19	11,08	8,32	44,56	32,67

Muestra	pH (1:2,5)	PiR	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC
promedio		0,25	3,20	16,03	10,00	42,42	28,10

**tercer grupo Ca: desde 1249 hasta 1849 mg.k<sup>-1</sup>**

Muestra	Casuelo	%PiR	%PiL	%PiML	%PiLL	%PiO	%PiRC
sue-09	1348,78	0,11	2,13	15,94	13,73	41,69	26,39
sue-44	1355,46	0,11	2,94	14,76	10,49	44,55	27,15
sue-07	1367,70	0,37	2,90	9,60	5,61	51,53	29,99
sue-16	1389,60	0,32	1,61	9,32	7,95	46,71	34,09
sue-19	1517,39	0,16	1,39	17,52	6,09	50,28	24,56
sue-18	1525,55	0,32	1,66	14,98	6,88	53,69	22,48
sue-08	1677,64	0,21	2,07	13,35	4,90	47,02	32,45
sue-14	1778,16	2,48	4,61	22,06	26,41	26,17	18,27
Muestra	pH (1:2,5)	PiR	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC
promedio		0,51	2,41	14,69	10,26	45,21	26,92

**cuarto grupo Ca: desde 1849 hasta 3049 mg.k<sup>-1</sup>**

Muestra	Ca suelo	%PiR	%PiL	%PiML	%PiLL	%PiO	%PiRC
sue-36	1913,77	0,25	1,55	11,28	4,90	51,66	30,35
sue-04	1923,30	0,20	2,28	18,17	14,02	40,86	24,47
sue-17	2018,33	0,32	1,65	12,32	6,39	42,17	37,14
sue-38	2173,55	0,46	3,44	22,27	21,54	26,35	25,95
sue-29	2273,59	0,24	1,25	9,19	4,08	59,36	25,88
sue-28	2332,97	0,23	1,46	10,57	8,46	46,21	33,07
sue-23	2352,81	0,17	1,30	17,41	11,87	44,06	25,19
sue-48	2391,68	0,62	2,52	16,04	14,90	42,15	23,77
sue-41	2798,22	0,09	1,76	14,10	9,21	37,64	37,19
sue-37	2811,46	0,67	2,94	21,05	19,06	23,11	33,16
Muestra		PiR	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC
promedio		0,33	2,01	15,24	11,45	41,36	29,62

Grupos por MOS

**Primer grupo MO: 1,65 a 2,15**

Muestra	%MO	%PiR	%PiL	%PiML	%PiL	%PiO	%PiC
sue-02	1,70	0,43	10,29	23,12	14,22	25,62	26,31
sue-46	1,80	0,39	6,18	17,39	10,74	26,25	39,05
sue-47	2,00	0,34	6,06	20,98	18,62	26,48	27,52
sue-33	2,10	0,2	4,18	17,91	6,3	48,53	22,88
sue-35	2,10	0,48	9,57	28,65	14,9	24,96	21,43

Muestra	PiR	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC
promedio	0,37	7,26	21,61	12,96	30,37	27,44

**Segundo grupo MO: 2,15 a 2,65**

Muestra	%MO	%PiR	%PiL	%PiML	%PiL	%PiO	%PiC
sue-03	2,20	0,12	3,01	36,07	6,77	24,93	29,09
sue-05	2,30	0,18	3,19	11,08	8,32	44,56	32,67
sue-07	2,30	0,37	2,9	9,6	5,61	51,53	29,99

sue-21	2,30	0,31	3,31	19,45	7,82	38,55	30,57
sue-24	2,30	1,06	8,91	21,45	9,14	25,27	34,17
sue-49	2,30	0,16	2,25	12,74	6,5	49,57	28,79
sue-20	2,40	0,23	1,38	12,83	4,49	52,69	28,37
sue-27	2,40	0,3	4,81	19,63	7,41	26,06	41,79
sue-31	2,40	0,29	5,25	23,79	1,8	27,42	41,46
sue-40	2,40	0,15	3,13	20,33	1,39	37,92	37,08
sue-26	2,50	0,3	4,22	19,45	11,58	27,28	37,17
sue-01	2,60	0,15	4,6	24,87	16,03	36,44	17,91
sue-11	2,60	0,35	3,72	18,02	9,64	40,4	27,86
sue-13	2,60	0,17	1,01	5,07	2,73	55,71	35,3
sue-34	2,60	0,23	6,22	22,3	4,26	35,85	31,13
		PiR	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC
promedio		0,29	3,86	18,45	6,90	38,28	32,22

### Tercer grupo MO: 2,65 a 3,15

Muestra	%MO	%PiR	%PiL	%PiML	%PiL	%PiO	%PiC
sue-08	2,70	0,21	2,07	13,35	4,9	47,02	32,45
sue-14	2,70	2,48	4,61	22,06	26,41	26,17	18,27
sue-18	2,70	0,32	1,66	14,98	6,88	53,69	22,48
sue-30	2,70	0,45	6,37	28,7	15,66	31,75	17,06
sue-36	2,70	0,25	1,55	11,28	4,9	51,66	30,35
sue-10	2,80	0,18	2,87	14,97	6,99	45,81	29,18
sue-43	2,80	0,15	3,54	13,44	6,66	54,16	22,04
sue-45	2,80	0,54	5,98	21,69	21,91	30,17	19,72
sue-06	3,00	0,3	3,69	16,42	20,25	33,8	25,54
sue-22	3,00	0,3	1,91	21,8	4,87	38,46	32,65
sue-29	3,00	0,24	1,25	9,19	4,08	59,36	25,88
		PiR	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC
promedio		0,49	3,23	17,08	11,23	42,91	25,06

### Cuarto grupo MO: 3,15 a 4,15

Muestra	%MO	%PiR	%PiL	%PiML	%PiL	%PiO	%PiC
sue-16	3,20	0,32	1,61	9,32	7,95	46,71	34,09
sue-41	3,20	0,09	1,76	14,1	9,21	37,64	37,19
sue-44	3,20	0,11	2,94	14,76	10,49	44,55	27,15
sue-38	3,40	0,46	3,44	22,27	21,54	26,35	25,95
sue-04	3,50	0,2	2,28	18,17	14,02	40,86	24,47
sue-09	3,50	0,11	2,13	15,94	13,73	41,69	26,39
sue-17	3,50	0,32	1,65	12,32	6,39	42,17	37,14
sue-48	3,50	0,62	2,52	16,04	14,9	42,15	23,77
sue-28	3,60	0,23	1,46	10,57	8,46	46,21	33,07
sue-19	3,70	0,16	1,39	17,52	6,09	50,28	24,56
sue-37	3,80	0,67	2,94	21,05	19,06	23,11	33,16
sue-23	4,00	0,17	1,3	17,41	11,87	44,06	25,19
		PiR	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC
promedio		0,29	2,12	15,79	11,98	40,48	29,34

### Grupo por años de fertilización

#### **primer grupo de 5 a 17 años**

Muestra	Tiempo años	%PiR	%PiL	%PiML	%PiLL	%PiO	%PiC
sue-16	5	0,32	1,61	9,32	7,95	46,71	34,09
sue-17	5	0,32	1,65	12,32	6,39	42,17	37,14
sue-31	5	0,29	5,25	23,79	1,8	27,42	41,46
sue-08	9	0,21	2,07	13,35	4,9	47,02	32,45
sue-10	10	0,18	2,87	14,97	6,99	45,81	29,18
sue-13	10	0,17	1,01	5,07	2,73	55,71	35,3
sue-37	10	0,67	2,94	21,05	19,06	23,11	33,16
sue-01	13	0,15	4,6	24,87	16,03	36,44	17,91
sue-38	15	0,46	3,44	22,27	21,54	26,35	25,95
sue-03	16,50	0,12	3,01	36,07	6,77	24,93	29,09
		PiR	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC
promedio	9,11	0,29	2,85	18,31	9,42	37,57	31,57

#### **segundo grupo de 17 a 29 años**

Muestra	Tiempo años	%PiR	%PiL	%PiML	%PiLL	%PiO	%PiC
sue-40	18	0,15	3,13	20,33	1,39	37,92	37,08
sue-06	20	0,3	3,69	16,42	20,25	33,8	25,54
sue-19	20	0,16	1,39	17,52	6,09	50,28	24,56
sue-24	25	1,06	8,91	21,45	9,14	25,27	34,17
		PiR	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC
promedio	18,42	0,42	4,28	18,93	9,22	36,82	30,34

#### **tercer grupo de 30 a 41 años**

Muestra	Tiempo años	%PiR	%PiL	%PiML	%PiLL	%PiO	%PiC
sue-14	30	2,48	4,61	22,06	26,41	26,17	18,27
sue-18	30	0,32	1,66	14,98	6,88	53,69	22,48
sue-27	30	0,3	4,81	19,63	7,41	26,06	41,79
sue-34	30	0,23	6,22	22,3	4,26	35,85	31,13
sue-35	30	0,48	9,57	28,65	14,9	24,96	21,43
sue-41	30	0,09	1,76	14,1	9,21	37,64	37,19
sue-49	30	0,16	2,25	12,74	6,5	49,57	28,79
sue-04	32	0,2	2,28	18,17	14,02	40,86	24,47
sue-29	35	0,24	1,25	9,19	4,08	59,36	25,88
sue-05	40	0,18	3,19	11,08	8,32	44,56	32,67
sue-11	40	0,35	3,72	18,02	9,64	40,4	27,86
sue-21	40	0,31	3,31	19,45	7,82	38,55	30,57
sue-26	40	0,3	4,22	19,45	11,58	27,28	37,17
sue-28	40	0,23	1,46	10,57	8,46	46,21	33,07
sue-36	40	0,25	1,55	11,28	4,9	51,66	30,35
sue-43	40	0,15	3,54	13,44	6,66	54,16	22,04
		PiR	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC
promedio	40,00	0,39	3,46	16,57	9,44	41,06	29,07

Muestra	Tiempo años	%PiR	%PiL	%PiML	%PiLL	%PiO	%PiC
sue-09	45	0,11	2,13	15,94	13,73	41,69	26,39

---

sue-30	45	0,45	6,37	28,7	15,66	31,75	17,06
sue-22	48	0,3	1,91	21,8	4,87	38,46	32,65
sue-07	50	0,37	2,9	9,6	5,61	51,53	29,99
sue-23	50	0,17	1,3	17,41	11,87	44,06	25,19
sue-33	51	0,2	4,18	17,91	6,3	48,53	22,88
		PiR	PiL	PiML	PiLL	PiO	PiRC
promedio	48,17	0,27	3,13	18,56	9,67	42,67	25,69



## FRACCCIONES ORGANICAS

## Grupos por pH

**primer grupo pH: 3,52-5,02**

Muestra	pH (1:2,5)	%PoL	%PoML	%PoLL	%PoO
sue-34	3,53	17,47	57,28	4,48	20,77
sue-35	4,15	16,55	52,85	1,07	29,54
sue-21	4,91	24,72	64,77	9,82	0,69
sue-37	4,91	10,77	68,16	8,45	12,63
sue-27	4,98	22,8	50,04	8,77	18,38
promedio		PoL	PoML	PoLL	PoO
		18,462	58,62	6,518	16,402

**Segundo grupo pH: 5,02-5,52**

Muestra	pH (1:2,5)	%PoL	%PoML	%PoLL	%PoO
sue-24	5,03	28,04	54,66	13,17	4,13
sue-33	5,03	17,01	58,84	3,75	20,41
sue-30	5,06	12,48	46,99	8,59	31,93
sue-31	5,13	19,12	53,61	6,4	20,87
sue-49	5,14	16,84	61,15	4,91	17,1
sue-22	5,19	12,55	77,77	2,91	6,76
sue-02	5,20	28,77	36,79	7,58	26,85
sue-03	5,24	34,18	41,03	1,27	23,51
sue-47	5,28	15,44	62,71	7,6	14,25
sue-26	5,30	17,89	43,23	11,12	27,76
sue-46	5,30	24,45	60,29	4,4	10,85
sue-09	5,38	22,34	52,03	2,71	22,92
sue-01	5,43	5,43	44,75	5,61	44,21
sue-44	5,46	7,63	54,38	4,6	33,39
sue-41	5,48	13,48	56,83	7,35	22,34
sue-13	5,50	16,51	43,88	6,18	33,43
sue-04	5,51	23,55	38,57	7,82	30,05
sue-10	5,51	14,01	61,45	5,58	18,96
sue-19	5,52	16,32	68,76	6,39	8,53
promedio		PoL	PoML	PoLL	PoO
		18,21	53,56	6,21	22,01

**tercer grupo pH: 5,52-6,02**

Muestra	pH (1:2,5)	%PoL	%PoML	%PoLL	%PoO
sue-23	5,53	24,7	50,42	16,94	7,93
sue-26	5,52	11,64	52,28	7,70	28,10
sue-40	5,61	15,3	67,31	4,6	12,79
sue-20	5,66	17,8	65,8	10,95	5,45

sue-28	5,72	15,33	36,85	11,53	36,29
sue-38	5,72	9,96	56,74	9,83	23,48
sue-17	5,75	8,56	73,89	4,23	13,32
sue-11	5,79	18,08	51,06	10,56	20,29
sue-45	5,85	5,19	64,79	2,23	27,8
sue-18	5,89	16,87	29,78	19,63	33,72
sue-16	5,93	11,85	59,82	7,84	20,49
sue-29	5,96	13,3	32,75	4,42	49,53
sue-06	6,01	18,24	41,73	3,2	36,83
promedio		PoL	PoML	PoLL	PoO
		14,17	53,26	8,62	23,95

#### cuarto grupo pH:6,02-7,02

Muestra	pH (1:2,5)	%PoL	%PoML	%PoLL	%PoO
sue-05	6,04	38,26	27,25	9,37	25,12
sue-08	6,10	32,92	32,49	3,4	31,19
sue-14	6,44	10,15	59,96	11,1	18,78
sue-48	6,64	0,56	35,53	44,93	18,99
sue-07	6,91	41,85	28,27	6,82	23,06
promedio		PoL	PoML	PoLL	PoO
		24,75	36,70	15,12	23,43

#### Grupos por Calcio

##### primer grupo Ca desde 49 hasta 649 mg .k<sup>-1</sup>

Muestra	Ca suelo	%PoL	%PoML	%PoLL	%PoO
sue-31	49,63	19,12	53,61	6,4	20,87
sue-24	353,85	28,04	54,66	13,17	4,13
sue-02	382,24	28,77	36,79	7,58	26,85
sue-34	385,78	17,47	57,28	4,48	20,77
sue-40	412,44	15,3	67,31	4,6	12,79
sue-46	449,15	24,45	60,29	4,4	10,85
sue-35	473,02	16,55	52,85	1,07	29,54
sue-27	484,69	22,8	50,04	8,77	18,38
sue-33	518,12	17,01	58,84	3,75	20,41
sue-21	524,71	24,72	64,77	9,82	0,69
sue-03	532,95	34,18	41,03	1,27	23,51
sue-47	622,90	15,44	62,71	7,6	14,25
sue-30	626,30	12,48	46,99	8,59	31,93
promedio		PoL	PoML	PoLL	PoO

##### segundo grupo Ca: desde 649 hasta 1249

Muestra	Ca suelo	%PoL	%PoML	%PoLL	%PoO
---------	----------	------	-------	-------	------

sue-01	688,78	5,43	44,75	5,61	44,21
sue-49	731,81	16,84	61,15	4,91	17,1
sue-43	788,36	11,49	62,33	6,98	19,2
sue-11	793,83	18,08	51,06	10,56	20,29
sue-13	841,69	16,51	43,88	6,18	33,43
sue-22	853,59	12,55	77,77	2,91	6,76
sue-26	877,82	17,89	43,23	11,12	27,76
sue-10	958,55	14,01	61,45	5,58	18,96
sue-45	1073,80	5,19	64,79	2,23	27,8
sue-20	1117,86	17,8	65,8	10,95	5,45
sue-06	1140,29	18,24	41,73	3,2	36,83
sue-05	1152,07	38,26	27,25	9,37	25,12
promedio		PoL	PoML	PoLL	PoO
		16,02	53,77	6,63	23,58

**tercer grupo Ca: desde 1249 hasta 1849**

Muestra	Ca suelo	%PoL	%PoML	%PoLL	%PoO
sue-09	1348,78	22,34	52,03	2,71	22,92
sue-44	1355,46	7,63	54,38	4,6	33,39
sue-07	1367,70	41,85	28,27	6,82	23,06
sue-16	1389,60	11,85	59,82	7,84	20,49
sue-19	1517,39	16,32	68,76	6,39	8,53
sue-18	1525,55	16,87	29,78	19,63	33,72
sue-08	1677,64	32,92	32,49	3,4	31,19
sue-14	1778,16	10,15	59,96	11,1	18,78
promedio		PoL	PoML	PoLL	PoO
		19,99	48,19	7,81	24,01

**cuarto grupo Ca: desde 1849 hasta 3049**

Muestra	Ca suelo	%PoL	%PoML	%PoLL	%PoO
sue-36	1913,77	11,64	52,38	7,79	28,19
sue-04	1923,30	23,55	38,57	7,82	30,05
sue-17	2018,33	8,56	73,89	4,23	13,32
sue-38	2173,55	9,96	56,74	9,83	23,48
sue-29	2273,59	13,3	32,75	4,42	49,53
sue-28	2332,97	15,33	36,85	11,53	36,29
sue-23	2352,81	24,7	50,42	16,94	7,93
sue-48	2391,68	0,56	35,53	44,93	18,99
sue-41	2798,22	13,48	56,83	7,35	22,34
sue-37	2811,46	10,77	68,16	8,45	12,63

**Grupo por MO****primer grupo MO: 1,65-2,15**

Muestra	%MO	%PoL	%PoML	%PoLL	%PoO
sue-02	1,70	28,77	36,79	7,58	26,85
sue-46	1,80	24,45	60,29	4,4	10,85
sue-47	2,00	15,44	62,71	7,6	14,25
sue-33	2,10	17,01	58,84	3,75	20,41
sue-35	2,10	16,55	52,85	1,07	29,54
promedio		PoL	PoML	PoLL	PoO
		20,44	54,30	4,88	20,38

### segundo grupo MO: 2,15-2,65

Muestra	%MO	%PoL	%PoML	%PoLL	%PoO
sue-03	2,20	34,18	41,03	1,27	23,51
sue-05	2,30	38,26	27,25	9,37	25,12
sue-07	2,30	41,85	28,27	6,82	23,06
sue-21	2,30	24,72	64,77	9,82	0,69
sue-24	2,30	28,04	54,66	13,17	4,13
sue-49	2,30	16,84	61,15	4,91	17,1
sue-20	2,40	17,8	65,8	10,95	5,45
sue-27	2,40	22,8	50,04	8,77	18,38
sue-31	2,40	19,12	53,61	6,4	20,87
sue-40	2,40	15,3	67,31	4,6	12,79
sue-26	2,50	17,89	43,23	11,12	27,76
sue-01	2,60	5,43	44,75	5,61	44,21
sue-11	2,60	18,08	51,06	10,56	20,29
sue-13	2,60	16,51	43,88	6,18	33,43
sue-34	2,60	17,47	57,28	4,48	20,77
promedio		PoL	PoML	PoLL	PoO
		22,29	50,27	7,60	19,84

### tercer grupo MO:2,65-3,15

Muestra	%MO	%PoL	%PoML	%PoLL	%PoO
sue-08	2,70	32,92	32,49	3,4	31,19
sue-14	2,70	10,15	59,96	11,1	18,78
sue-18	2,70	16,87	29,78	19,63	33,72
sue-30	2,70	12,48	46,99	8,59	31,93
sue-36	2,70	11,64	52,38	7,79	28,19
sue-43	2,80	11,49	62,33	6,98	19,2
sue-45	2,80	5,19	64,79	2,23	27,8
sue-06	2,90	18,24	41,72	2,2	26,82
sue-29	3,00	13,3	32,75	4,42	49,53
promedio		PoL	PoML	PoLL	PoO

	14,48	50,10	7,03	28,39
--	-------	-------	------	-------

**cuarto grupo MO: 3,15 a 4,15**

Muestra	%MO	%PoL	%PoML	%PoLL	%PoO
sue-16	3,20	11,85	59,82	7,84	20,49
sue-41	3,20	13,48	56,83	7,35	22,34
sue-44	3,20	7,63	54,38	4,6	33,39
sue-38	3,40	9,96	56,74	9,83	23,48
sue-04	3,50	23,55	38,57	7,82	30,05
sue-09	3,50	22,34	52,03	2,71	22,92
sue-17	3,50	8,56	73,89	4,23	13,32
sue-48	3,50	0,56	35,53	44,93	18,99
sue-28	3,60	15,33	36,85	11,53	36,29
sue-19	3,70	16,32	68,76	6,39	8,53
sue-37	3,80	10,77	68,16	8,45	12,63
sue-23	4,00	24,7	50,42	16,94	7,93
promedio		PoL	PoML	PoLL	PoO
		13,75	54,33	11,05	20,86

**Grupo por Años de fertilización fosfatada****primer grupo de 5 a 17 años**

Muestra	Tiempo años	%PoL	%PoML	%PoLL	%PoO
sue-16	5,00	11,85	59,82	7,84	20,49
sue-17	5,00	8,56	73,89	4,23	13,32
sue-31	5,00	19,12	53,61	6,4	20,87
sue-08	9,00	32,92	32,49	3,4	31,19
sue-10	10,00	14,01	61,45	5,58	18,96
sue-13	10,00	16,51	43,88	6,18	33,43
sue-37	10,00	10,77	68,16	8,45	12,63
sue-01	13,00	5,43	44,75	5,61	44,21
sue-38	15,00	9,96	56,74	9,83	23,48
sue-03	16,50	34,18	41,03	1,27	23,51
promedio		PoL	PoML	PoLL	PoO
		16,33	53,58	5,88	24,21

**segundo grupo de 17 a 29 años**

Muestra	Tiempo años	%PoL	%PoML	%PoLL	%PoO
sue-40	18,00	15,3	67,31	4,6	12,79
sue-06	20,00	18,24	41,73	3,2	36,83
sue-19	20,00	16,32	68,76	6,39	8,53
sue-24	25,00	28,04	54,66	13,17	4,13
promedio		PoL	PoML	PoLL	PoO

19,48	58,12	6,84	15,57
-------	-------	------	-------

**tercer grupo de 29 a 41 años**

Muestra	Tiempo años	%PoL	%PoML	%PoLL	%PoO
sue-14	30,00	10,15	59,96	11,1	18,78
sue-18	30,00	16,87	29,78	19,63	33,72
sue-27	30,00	22,8	50,04	8,77	18,38
sue-34	30,00	17,47	57,28	4,48	20,77
sue-35	30,00	16,55	52,85	1,07	29,54
sue-41	30,00	13,48	56,83	7,35	22,34
sue-49	30,00	16,84	61,15	4,91	17,1
sue-04	32,00	23,55	38,57	7,82	30,05
sue-29	35,00	13,3	32,75	4,42	49,53
sue-05	40,00	38,26	27,25	9,37	25,12
sue-11	40,00	18,08	51,06	10,56	20,29
sue-21	40,00	24,72	64,77	9,82	0,69
sue-26	40,00	17,89	43,23	11,12	27,76
sue-28	40,00	15,33	36,85	11,53	36,29
sue-36	40,00	11,64	52,38	7,79	28,19
sue-43	40,00	11,49	62,33	6,98	19,2
promedio		PoL	PoML	PoLL	PoO
		18,03	48,57	8,55	24,86

**cuarto grupo de 41 a 51 años**

Muestra	Tiempo años	%PoL	%PoML	%PoLL	%PoO
sue-09	45,00	22,34	52,03	2,71	22,92
sue-30	45,00	12,48	46,99	8,59	31,93
sue-22	48,00	12,55	77,77	2,91	6,76
sue-07	50,00	41,85	28,27	6,82	23,06
sue-23	50,00	24,7	50,42	16,94	7,93
sue-33	51,00	17,01	58,84	3,75	20,41
promedio		PoL	PoML	PoLL	PoO
		21,82	52,39	6,95	18,84