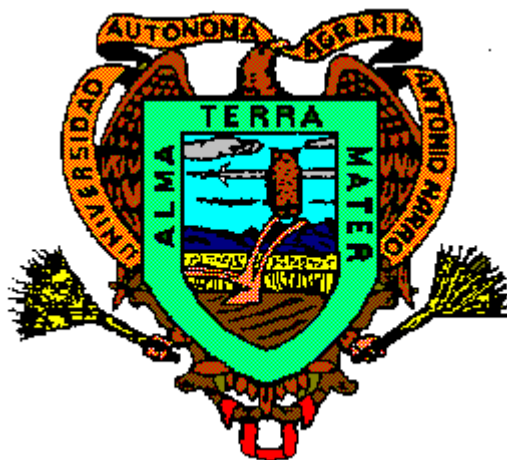


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
“ANTONIO NARRO”**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**



**ISOTERMAS DE ADSORCIÓN Y CURVAS DE  
DESORCIÓN DE FÓSFORO EN SUELOS CALCÁREOS**

**POR:**

**ELENA ESTRELLA**

**TESIS**

Presentada como Requisito Parcial  
para obtener el Título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN SUELOS**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México  
Marzo de 1999

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
“ANTONIO NARRO”  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

**Isotermas de adsorción y curvas de desorción de  
fósforo en suelos calcáreos.**

**POR**

**ELENA ESTRELLA**

**TESIS**

**Que somete a consideración del H. Jurado examinador como  
requisito parcial para obtener el Título de:**

**INGENIERO AGRÓNOMO EN SUELOS**

**Asesor principal**

---

**Dr. Edmundo Peña Cervantes**

**Asesor**

**Asesor**

---

**M.C. Rogelio A. Aldaco Nuncio**  
**Dovala**

---

**M.C. Juan Manuel Cepeda**

**Coordinador de la División de Ingeniería**

---

**Ing. Jesús R. Valenzuela García**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Marzo 1999**

## DEDICATORIA

Con mucho amor, respeto y admiración para quienes causé desvelos y preocupaciones, pero que estoy muy agradecida por haberme dado la vida y que desde entonces me han apoyado y brindado toda su confianza, que con sus bendiciones me he ido superando día a día en esta vida.

A mis padres

Sr. Manuel Estrella Morales  
Sra. Antonia Mendoza Hernández

A mis hermanos que al igual que a mis padres los quiero mucho y siempre los llevo dentro de mi: Margarita, Victoria, Carmen, María, Marcelino, Adela, José . En forma especial a mi hermana Carmen por su valioso apoyo durante el curso de mi carrera.

Con mucho amor a mis sobrinos, (en especial a Alejandra) así como a mis cuñadas, tías y primos se las dedico con mucho cariño.

A la Sra. Rosario Ochoa por haberme brindado su apoyo cuando más necesitaba, mil gracias.

A la familia Villafaña Arroyo por su amistad y su apoyo moral y espiritual que me han brindado siempre.

Con mucho cariño a José Antonio Villatoro F. Por su amistad y comprensión que siempre me ha brindado durante todo este tiempo.

A mis amigos de la Universidad, Ada Ibeth López, Alma Mireya Calzada, Claudia Huerta, Hilda Romero, Lourdes García, Verónica Aguilar, Guadalupe Arroyo, Conchis Alvarado, Omar Torres, Ruben Franco, Homero Barriga, Marco Antonio Iglesias, Luis Miguel Contreras M.

A todas las personas que de una u otra forma me ayudaron a la realización de este trabajo.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios nuestro señor por darme la vida y la fuerza para poder llegar a disfrutar estos momentos.

Con mucho agradecimiento para mis padres que con su confianza, amor y esfuerzo permitieron que yo me formara una persona de bien al convertirme en un profesionalista.

A mi Alma Terra Mater, por brindarme facilidades de superarme y por permitirme formar parte de su gran familia.

Al Dr. Edmundo Peña Cervantes por brindarme la confianza para la realización de este trabajo, por su asesoría, así como por la orientación y amistad incondicional.

Al M.C. Rogelio A. Aldaco Nuncio principalmente por darme la oportunidad de tomar parte en su proyecto de investigación, por brindarme su apoyo, amistad y gran parte de su tiempo para la realización y formación de este trabajo.

Al M.C. Juan Manuel Cepeda Dovala que con su incondicional apoyo, entusiasmo de superación logre concluir este trabajo.

Al Departamento de Suelos por haberme tenido las puertas abiertas para la realización de mis trabajos y a todos los maestros que lo integran. Gracias

## INDICE DE CONTENIDO

	<b>Pág</b>
<b>INDICE DE CUADROS</b> .....	Vii
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	Viii
<b>I INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 OBJETIVOS E HIPOTESIS .....	3
<b>II REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	4
2.1 Ciclo del fósforo .....	4
2.2 Definición de suelos alcalinos y calcáreos .....	5
2.3 El fósforo en los suelos .....	5
2.4 Contenido de fósforo en los suelo .....	5
2.5 Formas de fósforo en el suelo .....	7
2.6 Reacciones del fósforo en los suelos .....	9
2.7 Fijación de fósforo en el suelo .....	11
2.8 Factores que influyen en la disponibilidad de fósforo en los suelos ...	14
2.9 Isotermas de adsorción .....	15
<b>III MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	22
3.1 Descripción del área .....	22
3.1.1. Rancho el Bayonero de Arteaga Coahuila .....	22
3.1.2. Rancho el Venado de Parras coahuila .....	23
3.1.3. Rancho el Potrero de Navidad Nuevo León .....	24
3.1.4. Rancho el Erial de Galeana Nuevo León .....	26
3.2 Análisis fisico-quimicos .....	27
3.3 Preparación de las muestras .....	27
3.4 Metodología para la cuantificación de fósforo .....	28
3.4.1. Fósforo hidrosoluble (método de Vander Paauw) .....	28
3.4.2. Fósforo extractable (método de Olsen) .....	28
3.4.3. Fósforo extractable con CaCl <sub>2</sub> 0.01 molar .....	29
<b>IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	30

4.1	Método de fósforo hidrosoluble .....	30
4.1.1.	Isotermas de Langmuir .....	30
4.1.2.	Isotermas de temkin .....	35
4.2	Método de fósforo en solución de CaCl <sub>2</sub> .....	38
4.2.1.	Isotermas de adsorción de Langmuir .....	38
4.2.2.	Isotermas de adsorción de Temkin .....	39
4.3	Curvas de desorción de fósforo .....	41
<b>V</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>47</b>
<b>VI</b>	<b>RESUMEN</b> .....	<b>49</b>
<b>VII</b>	<b>LITERATURA CITADA</b> .....	<b>51</b>
	<b>APENDICE</b> .....	<b>55</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>CUADRO</b>	<b>Pág.</b>
2.6 Compuestos que existen a diferentes valores de pH y grado de solubilidad.....	11
4.1 Capacidad máxima de adsorción de fósforo (b) y constante de energía de retención (k) de los suelos en estudio, valores calculados a partir de la ecuación de Langmuir.....	32
4.2 Capacidad máxima de retención (b), la constante de energía de retención (k) y algunas propiedades de los suelos en estudio.....	34
4.3 Fósforo en solución en relación a la pendiente de las isothermas de Temkin, en cuatro localidades .....	37
4.4 Valores de fósforo en solución ( $\text{mg}\cdot\text{Lt}^{-1}$ ) en función de diferentes niveles de fósforo adsorbido ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) .....	38
4.5 Fósforo en solución en relación a la pendiente de isothermas de Temkin, en cuatro localidades .....	40
4.6 Valores de fósforo en solución ( $\text{mg}\cdot\text{Lt}^{-1}$ ) en función de diferentes niveles de fósforo adsorbido ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) .....	41
4.7 Fósforo liberado ( $\text{mg P}\cdot\text{kg}^{-1}$ suelo) en función de cuatro niveles iniciales de fósforo, en los suelos de estudio. Método de fósforo hidrosoluble. ....	43
4.8 Fósforo liberado por el método de $\text{CaCl}_2$ 0.01M, en función de cuatro niveles iniciales de fósforo en los suelos de estudio ( $\text{mgP}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).....	46

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA</b>	<b>Pág.</b>
2.1 Ciclo del fósforo .....	4
4.1 Isotermas de adsorción de Langmuir .Método del fósforo hidrosoluble.....	31
4.2 Isotermas de adsorción de Temkin. Método del fósforo hidrosoluble .....	36
4.3 Isotermas de adsorción de Temkin. Método del fósforo en solución de CaCl <sub>2</sub> 0.01M.....	39
4.4 Curvas de desorción de fósforo. Método del fósforo hidrosoluble .....	42
4.5 Curvas de desorción de fósforo. Método del fósforo en solución de CaCl <sub>2</sub> 0.01M.....	45



## I. INTRODUCCIÓN

Las características del clima de los suelos áridos y semiaridos del Norte de México han contribuido notablemente a la formación de suelos que tienen limitaciones en cuanto a erosión, profundidad, textura arcillosa, pH básicos, altos contenidos de carbonatos, poco contenido de materia orgánica y la presencia de sodio y sales solubles.

Uno de los mayores problemas que presentan los suelos calcáreos en la región es la baja disponibilidad de nutrimentos como el fósforo, fierro, zinc y el manganeso, esto es ocasionado por las características químicas propias de los suelos de zonas áridas, lo que provoca que el productor utilice altas cantidades de fertilizantes para tratar de eliminar estas deficiencias y obtener así rendimientos aceptables de los cultivos.

En estos suelos existen varios problemas relacionados con la nutrición vegetal de los cultivos destacandose, entre otros, la fertilización fosfatada en virtud de la gran capacidad de fijación de fósforo que poseen estos suelos, que llega a ser un factor que interfiere en el desarrollo normal de los mismos.

En suelos calcáreos el fósforo es retenido firmemente en el complejo mineral del suelo, además de que los altos niveles de carbonato de calcio conducen a una inmovilización del fósforo que es aplicado como fertilizante, presentándose una baja disponibilidad de fósforo ya que el suelo compite con la planta por el ion ortofosfato causando una disminución en el rendimiento de los cultivos.

Un reto importante de la química agrícola moderna ha sido el de obtener métodos que permitan determinar con precisión las dosis de fertilizantes necesarias para lograr resultados óptimos de producción .

Son numerosos los métodos que se han propuesto para estimar el estado del fósforo en los suelos. Algunos analizan directamente el nivel del elemento en su forma aprovechable (factor Q). En otros casos se analiza la concentración del elemento existente en la solución del suelo (factor I), mientras que las isotermas de adsorción, utilizan la interrelación de ambos parámetros, ya que incluye un factor intensidad (I) que es la concentración de fósforo en el equilibrio y un factor cantidad (Q) representado por la cantidad de fósforo que está adsorbido en la superficie del suelo. Así es posible evaluar los requerimientos de fósforo en el punto de equilibrio, para un suelo en particular, de acuerdo a lo anterior se determino realizar los siguientes objetivos:

## **1.2. OBJETIVOS**

1. Determinar la capacidad de adsorción de fósforo en cuatro suelos calcáreos mediante el uso de las isotermas de adsorción
2. Determinar la capacidad de liberación de fósforo por medio de las curvas de desorción en cuatro suelos calcáreos

## **1.1. HIPÓTESIS**

1. Diferentes características físico-químicas de los suelos calcáreos afectan los mecanismos de fijación y disponibilidad de fósforo.
2. Hay diferentes modelos matemáticos que pueden describir adecuadamente los procesos de adsorción y desorción de fósforo.



Burd, J. J. (1948), usa el término calcáreo para describir aquellos suelos que contienen grandes cantidades de calcio intercambiable y limitadas cantidades de caolinita u óxidos hidratados de fierro y aluminio, en los cuales el calcio juega un papel dominante en la solubilidad del fosfato.

### 2.3. El Fósforo en los Suelos.

Primo, Y. E y Carrasco, J. M. (1973), reportan que se considera generalmente que las plantas absorben la mayoría del fósforo en forma del ion primario ortofosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) y pequeñas cantidades del ion secundario ortofosfato ( $\text{HPO}_4^{=}$ ). Las cantidades relativas de éstos dos iones absorbidos por la planta están afectados por el pH del medio que rodea las raíces. Valores bajos del pH incrementan la absorción del ion  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , mientras los valores más altos del pH incrementan la absorción de la forma  $\text{HPO}_4^{=}$ .

### 2.4. Contenido de fósforo en los suelos .

Solís, M. M y Cajuste, L (1992), mencionan que las grandes variedades en el contenido total del fósforo en los suelos se debe a la heterogeneidad de las rocas parentales, al desarrollo de los suelos y a otras condiciones edafológicas y ecológicas. Aparentemente, los suelos jóvenes derivados de cenizas volcánicas presentan un mayor contenido de fósforo que los desarrollados de sedimentos meteorizados y depositados en las áreas tropicales bajas. Así mismo , la disponibilidad del fósforo en el suelo depende

de ciertos factores como textura, profundidad, contenido de materia orgánica, pH, aireación, compactación, humedad y contenidos de carbonatos, etc.

Fassbender, H. W (1980), reporta que la distribución de fósforo en suelos agrícolas es muy variable porque depende fundamentalmente de la distribución de las fuentes naturales de éste elemento, del manejo de suelos y de las condiciones ambientales cuyas interrelaciones son determinadas para explicar las variaciones en el contenido de fósforo reportado, por ejemplo en las zonas templadas existen de 1000 a 1200 kg/ha, en tanto que en las zonas tropicales es muy variable.

Cajuste, L. J. (1977), menciona que la cantidad de fósforo en la capa arable de los suelos agrícolas varían de 0.01 a 0.15 por ciento (aproximadamente 100 a 1500 mg de P/kg) con un promedio de cerca de 0.06 por ciento (aproximadamente 600 mg de P/kg).

Licón, T.L. (1994). Concluye que en suelos minerales de áreas templadas el contenido total varia entre 0.02 a 0.08 por ciento (200 a 800 mg de P/kg) y en promedio gira alrededor 0.05 (500 mg de P/kg).

## 2.5. Formas del Fósforo en el Suelo

a).- Fósforo inorgánico.

Ortega (1970), señala que la mayoría de los suelos tienen un contenido que puede variar de 0.039 a 0.22 por ciento, este fósforo está principalmente ligado a hidróxidos de hierro y aluminio en suelos tropicales y al calcio en suelos de regiones áridas y semiáridas.

Los fosfatos se pueden clasificar de acuerdo a su composición química, física, mineralógica o por combinación de ellas, utilizando varios solventes que se espera que extraigan las distintas formas de fósforos; Chang y Jackson (1957), con respecto a lo anterior han podido después de modificaciones citar el uso de soluciones de: cloruro de amonio 1 N , fluoruro de amonio 0.5 N , hidróxido de sodio 0.1 N , ácido sulfúrico 0.5 N, citrato de sodio 0.3 N, más ditionito de sodio y fluoruro de amonio 0.5 N en forma consecutiva.

Chang y Jackson (1957), Kurtz (1963) y Palma (1970), clasifican la fracción inorgánica en 4 categorías:

fosfatos de calcio

fosfatos de aluminio

fosfatos de hierro

fosfatos ocluidos

Los primeros se presentan principalmente como apatías, pero las formas de fosfato dicálcico, fosfato monocálcico y fosfato ortocálcico se hallan también en pequeñas cantidades.

Los fosfatos de Fe y Al se representan principalmente por las series varicitas, barrendita y estringita. Los últimos corresponden a aquellos que están protegidos por películas de Fe y Al cubriendo los agregados o concentraciones.

#### b).- Fosfatos orgánicos

Estos se hallan en relación directa con el contenido de materia orgánica y por lo tanto es comparativamente menor en el subsuelo que en la capa arable.

Black, (1968), reporta que el contenido del fósforo orgánico varía desde cantidades tan bajas que van de 0.3 por ciento al 95 por ciento con respecto al fósforo total.

La importancia de esta fracción es principalmente como fuente de reserva de fósforo porque no hay evidencias de que las plantas pueden absorberlo en forma orgánica, sino hasta que es mineralizado a partir de la materia orgánica que la contiene.

De acuerdo a Black (1968 b), Tisdale y Nelson (1977) y Ortega (1970 c), existen cinco principales fosfatos orgánicos en el suelo, estos son: Fosfolípidos, Ácidos nucleicos, Fosfatos de inositol, Fosfatos metabólicos y fosfoproteínas.



## 2.6. Reacciones del Fósforo en los Suelos.

Precipitación superficial en la fase sólida del carbonato cálcico. En los suelos alcalinos los iones fosfatos entran en contacto con la superficie del carbonato de calcio causando la disminución de la actividad del fósforo. La cantidad de precipitación que tiene lugar es influenciada por la cantidad de superficie del carbonato de calcio y por la concentración del fosfato en la solución circundante.

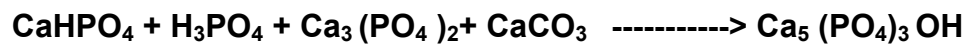
Rivero, O. P (1988), señala que algunos investigadores, indican que en éstos suelos los fosfatos pueden reaccionar en la superficie de carbonatos de calcio para formar una superficie de precipitados cálcicos o pueden reaccionar con el calcio soluble o intercambiable formando hidroxiapatitas,  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ .

Este mismo autor menciona que en suelos calcáreos las reacciones responsables de la fijación de fósforo se dividen en dos grupos:

1). Reacciones de adsorción. Cuando el fósforo es aplicado en solución diluida o en sales de pH cercano a la neutralidad a éstos suelos, aparece una adsorción inicial de los iones fosfatos sobre las partículas de carbonato de calcio. De esta manera puede formarse una cubierta de fosfato sobre el carbonato de calcio que con el tiempo puede formarse más carbonato de calcio. Esto trae como consecuencia una tendencia de la solubilidad del

fósforo adsorbido a declinar y una acumulación del fosfato sobre la superficie de las partículas de carbonato de calcio.

2). Reacciones de precipitación. En este caso el fósforo soluble reacciona con el suelo para formar productos menos solubles. Casi inmediatamente, después llegan a ser aún más insolubles al reaccionar con el calcio, como se muestra a continuación:



Sin lugar a dudas el factor más determinante para la aprovechabilidad de los fosfatos en el suelo es el pH, dependiendo de la existencia de diferentes fosfatos. En un pH entre 6.0 y 7.8 existe el fosfato dicalcico, que es uno de los más fácilmente aprovechables; por debajo de un pH de 6.0 se incrementa la solubilidad de los compuestos de Fe y Al, formándose fosfatos de Fe y Al mismos que son insolubles.

**Cuadro No 1. Compuestos que existen a diferentes valores de pH y grado de solubilidad.**

<b>PH</b>	<b>Fosfatos combinados</b>	<b>Solubilidad</b>
3-4	Hierro y Aluminio	Insoluble
5-6	Hierro	Prácticamente insoluble
6-7.8	Calcio (CaHPO <sub>4</sub> )	Fácilmente soluble
>-8	Calcio Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	Prácticamente Insoluble
	También como sodio (Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> )	Insoluble

## 2.7. Fijación de fósforo en el suelo.

Kardos (1964), citado por Bear (1964), mencionan que la fijación esta considerada como el proceso en que los nutrimentos solubles son pasados a formas menos solubles, las reacciones causadas por los diferentes componentes del suelo ocasionan que los nutrimentos no puedan ser tomados por las plantas debido a su poca movilidad,

Ortiz, V.B. Y Ortiz S.C.A. (1990), concluyen que el termino fijación es el proceso o procesos en el suelo por el cual ciertos elementos químicos esenciales para el desarrollo de las plantas son convertidos de una forma soluble o intercambiable a una forma menos soluble o no intercambiable.

Tschirikow y Bear, citados por Miller y Kitrick (1955), señalan que se pueden presentar deficiencias en los suelos ácidos así como en aquellos alcalino-calcáreos. En suelos ácidos, los fosfatos son precipitados con el Hierro o el Aluminio formando compuestos menos solubles, algo similar ocurre en los alcalinos solo que en estos se forman compuestos con el Ca y Mg, por lo tanto la asimilación de los fosfatos por las plantas es difícil en ambos suelos. El problema de la no aprovechabilidad en suelos calcáreos esta ligado directamente con el contenido de  $\text{CaCO}_3$ .

Coleman (1944), reporta que la posibilidad de la inmovilidad del fósforo en arcillas minerales está determinada por la concentración de Al y que se puede disminuir la fijación al reducir la concentración del mismo en la solución del suelo.

Buehrer (1932), menciona que en las reacciones del suelo, el fósforo se encuentra presente como una ó varias formas en que se puede disociar el ácido fosfórico. La cantidad de estas formas presentes en el suelo están en función del pH.

Terman y Taylor (1970), concluyen que si la adsorción y la precipitación de los fósforos son simultáneos con la liberación de los fosfatos del fertilizante y si ésta ocurre en un tiempo menor al necesario para el desarrollo de un cultivo habrá una deficiencia de fósforo en suelos con características fijadoras de este elemento.

Teuscher y Adler (1979), reportan que si el pH es bajo los compuestos de Fe, Mn y Al se tornan activos, el Aluminio incluso puede volverse tóxico. Al aumentar el pH ocurre una precipitación del Al y la disminución del mismo, arriba de 7.0 las plantas tienen dificultad para tomar el Fe, Mn y además el P porque, aunque se halle presente se encuentra fijado por el suelo.

MC George y Breazle citados por Fuller (1950), reportan que una gran parte del fósforo nativo ó agregado en forma de fertilizante se fija en la roca

calcita ó es recubierto por el calcio libre volviéndose insoluble, así, las plantas tienen dificultad para absorberlo, afirmando que generalmente en las reacciones entre el  $\text{CaCO}_3$  y la roca fosfórica o el super fosfato se forman productos de muy baja solubilidad como carbonato-apatitas.

Ortega (1970 c), menciona que en los suelos calcáreos el  $\text{CaCO}_3$  tiene la característica de bajar la solubilidad de los fosfatos explicando esto por la aparición de un nuevo compuesto de baja solubilidad la carbonato-apatita.

Cajuste, L.J . (1977), concluye que cuando se aplican fertilizantes fosfatados en forma soluble en un suelo calcáreo, inmediatamente reaccionan con los componentes del suelo para formar compuestos muy insolubles, éstos compuestos son por lo tanto muy poco disponibles para las plantas.

## 2.8. Factores que influyen en la disponibilidad de fósforo en los suelos.

Además de la aplicación de materiales como fuente de fósforo se tiene en cuenta aspectos fisicoquímicos del suelo que en un momento dado van a alterar el contenido del mismo en la solución.

Tisdale y Nelson (1970). Citados por Gómez et al .(1980), mencionan que el pH tiene un efecto sobre las formas de fósforo en el suelo, pues el fósforo ligado al Ca se considera estable en el suelos alcalinos y aquel ligado al Fe y Al lo son en condiciones de acidez.

Aguilar (1960), concluye que los factores que intervienen para la disponibilidad de fósforo en un suelo calcáreo son alta concentración de calcio (por su gran capacidad para fijar el fósforo tanto nativo como agregado) y el pH alcalino favoreciendo este a la formación de fosfato de calcio insoluble.

MC Lean y Logan (1970), probando algunos fosfatos de hidrosolubilidad variable como fuente de fósforo en suelos de diferentes grados de fijación hallaron que con una fijación relativamente baja, el contenido de fósforo de la semilla de maíz se elevó en proporción directa a la hidrosolubilidad de fósforo asimilable. Determinaron también que en condiciones de encalado o fertilización en bandas se disminuye la fijación en cantidades pequeñas en suelos ácidos.

Webb et al (1961), reportan que en suelos calcáreos la disponibilidad de fósforo para las plantas se incrementa con el aumento de la hidrosolubilidad del fósforo aprovechable, mientras que en suelos ácidos este factor tuvo poco efecto. La ineffectividad en suelos calcáreos de las fuentes de fósforo menos solubles posiblemente se debe a su lenta dilución en este tipo de suelos.

2.9. Isotermas de adsorción. El fenómeno de adsorción se puede estudiar cuantitativamente mediante el conocimiento de las Isotermas de adsorción, que es la curva que resulta al graficar la concentración adsorbida por gramo de adsorbato (suelo) contra la concentración de solutos en equilibrio cuando el proceso ocurre a temperatura constante. A la adhesión o concentración de una sustancia disuelta sobre la superficie de un sólido o líquido se le conoce como "adsorción" esta puede ser física, cuando los enlaces son iónicos o covalentemente a temperaturas constantes y en términos cuantitativos; la adsorción que muestra la cantidad de soluto adsorbido por un adsorbente como una función de la concentración de equilibrio del soluto. Veith y Sposito (1977), reportan que la expresión matemática originalmente desarrollada por Langmuir para describir

la adsorción de un gas en un sólido puro ha sido con frecuencia adaptada para interpretar reacciones entre constituyentes sólidos del suelo y soluciones conteniendo aniones tales como: cloruros, sulfatos, boratos y fosfatos. Ortiz y Ortiz (1980), mencionan que la ecuación de Langmuir basada en la teoría cinética de los gases es usada extensamente para describir la adsorción de gas sobre sólidos, aunque a menudo es aplicada para la adsorción de líquidos y iones en solución por sólidos. La derivación de la ecuación de Langmuir se fundamenta en tres supuestos: una energía constante de adsorción la cual es independiente de la cantidad de la superficie cubierta (esto es una superficie homogénea); adsorción en sitios específicos, sin interacción entre las moléculas del soluto y que la adsorción máxima posible corresponde a la capa monomolecular completa sobre todas las superficies reactivas del absorbente.

La ecuación originalmente desarrollada para gases puede describirse como sigue:  $n = k \cdot \frac{bp}{1 + bp}$ . Después esta ecuación se modificó presentándose de la manera siguiente:  $\frac{p}{n} = \frac{1}{bk} + \frac{p}{k}$ . Posteriormente Charter y Baker, (1977), obtienen la ecuación más frecuentemente utilizada en química de suelos, en forma lineal la cual se adapta a la ecuación de la recta ( $y = ax + t$ )

donde:  $\frac{c}{q} = \frac{1}{k} + \frac{c}{q} \cdot \frac{1}{b}$   $\frac{q}{b} = \frac{kb}{1 + kb}$   $b =$   
 capacidad máxima de adsorción (mg P/kg. de suelo).  $k =$  constante relacionada con la energía de adsorción.  $c =$  concentración de la solución en equilibrio  $q =$  cantidad de P adsorbido por peso de suelo (mg P/kg suelo). Esta ecuación fue primero usada para describir la retención de fósforo en suelos por Olsen y Watanabe en (1957), a partir de entonces ha sido ampliamente usada para este propósito. Una ventaja para su uso es que pueda ser transformada a la regresión lineal para estimar los coeficientes. Estos autores concluyen que la ventaja más grande de la ecuación de Langmuir es que la adsorción máxima puede calcularse y servir como índice de la capacidad de retención del suelo. Sing y Jones (1977), muestran que el uso de Isotermas de adsorción para determinar los requerimientos de nutrimentos no solo se aplica al caso particular del fósforo si no también se utiliza este método para evaluar los requerimientos de potasio en el suelo. Estos estudios se realizaron en condiciones de invernadero en los cultivos de papa, apio, tomate y frijol. Cajuste (1979), señala que algunos suelos presentan propiedades físicas y químicas en común (textura, pH, contenido de aluminio intercambiable) sin embargo, son diferentes en sus contenidos de materia orgánica y algunos otros componentes químicos como lo son el fierro y el aluminio intercambiables. Concluye que éstos últimos componentes son los principales responsables de los altos valores de capacidad máxima de adsorción de fósforo, medida por la Isoterma de Langmuir. López Hernández et al (1984), trabajando con ocho muestras del estuario del lago de Maracaibo, determinaron su capacidad para retener diferentes concentraciones de fósforo, encontrando que el modelo de Freundlich es el mejor que describe todo el rango de concentraciones (0-250 mg P/kg), el modelo de Langmuir se ajusta a concentraciones relativamente bajas, en donde es menor la interacción entre los iones adsorbidos y el modelo de Temkin no describe bien la interrelación superficial adsorbente solución. Udo y Uzu (1972), indican que los suelos ácidos tropicales con cantidades

apreciables de sesquióxidos de hierro y aluminio, presentan un alto grado de fijación de fósforo, para ello utilizaron la Isoterma de Langmuir, obteniendo una correlación significativa entre los sesquióxidos de hierro y aluminio y el contenido de arcilla. Fox et al (1970), señalan la conveniencia de utilizar el método de Isotermas de adsorción de fósforo para reducir los requerimientos de fertilizantes fosfatados en suelos de propiedades físicas y químicas contrastantes en condiciones de invernadero, utilizando diversos cultivos. Determinaron que el suelo que presenta mayor adsorción es el que contiene arcillas amorfas en comparación con aquellos otros que contienen arcillas del tipo 1:1 o 1:2. Hsu (1964), estudiando los mecanismos de fijación de fósforo en suelos fuertemente ácidos y utilizando soluciones diluidas de  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  desde 0 a 60 mg/kg. Encontró que la relación entre el fósforo fijado y la concentración de fósforo en la solución, siguió la Isoterma de adsorción de Langmuir, de la misma manera al efectuarse las pruebas de desorción. Aunque el autor aclara que la adhesión a la Isoterma de Langmuir puede considerarse evidencia de una relación de adsorción bajo condiciones de pH 7, ausencia de Al intercambiable y un período corto de agitación, sin embargo la aplicación a la fijación de fosfato puede estar sujeta a algunas limitaciones. Woodruff y Kamprath (1965), utilizando la Isoterma de Langmuir calcularon la máxima adsorción de fósforo en un determinado número de suelos con propiedades químicas variables, al término del trabajo concluyeron que la neutralización de aluminio intercambiable redujo marcadamente la máxima adsorción de fósforo. Así mismo el crecimiento del Mijo (*Pennisetum Glaucum*), fue relacionado con el grado de saturación de la máxima adsorción de fósforo, encontrándose que el máximo rendimiento sobre los suelos calizos se obtuvieron cuando la concentración de fósforo en la solución de equilibrio fue mayor de  $0.1 \times 10^{-4}$  moles/litro de fósforo. Fassbender (1966), encontró que la capacidad máxima de adsorción es una función exponencial del tiempo de reacción, discutiéndose la posibilidad de interferencia de reacciones de precipitación en los resultados. Los datos de desorción se ajustan igualmente a la Isoterma de Langmuir, pero la capacidad máxima de desorción no corresponde a la real y ésta solo representa una fracción del fósforo retenido. Larsen (1967), enuncia los postulados de las Isotermas de Langmuir que son tres: (I) la energía de adsorción es constante lo cual implica sitios uniformes y no interacciones entre moléculas de adsorbato (II) la adsorción es sobre sitios localizados (esto implica no movimiento de traslación de moléculas adsorbidas en el plano de la superficie) (III) la adsorción máxima posible corresponde a una capa completa monomolecular. Bache y Williams (1971), utilizando una técnica estandarizada determinaron para 42 suelos las Isotermas de adsorción cubriendo un amplio rango de concentraciones de fósforo ( $10^{-6}$  a  $5 \times 10^{-3}$  M). Concluyendo que al graficar la adsorción (x), contra el logaritmo de la concentración de fósforo en la solución de equilibrio, se provee un adecuado índice de referencia para caracterizar las propiedades adsorptivas de fosfato de los suelos. Singh et al (1977), utilizaron las isotermas de adsorción para determinar los requerimientos de fósforo en algunos cultivos considerando una gran cantidad de suelos. Determinaron que algunas de las ventajas de utilizar las Isotermas de adsorción es que con éstas se pueden predecir los requerimientos de fósforo



sin necesidad de hacer ensayos de rendimiento en el campo y que éstas técnicas son una base adecuada para estimar los requerimientos de fósforo en el suelo.

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Descripción del área**

El presente trabajo se realizó durante los años 1997-1998. Utilizándose para las actividades de laboratorio, cuatro suelos de diferentes sitios que corresponden a los siguientes ranchos: "El Bayonero" de Arteaga Coahuila, "El Venado" de Parras Coahuila, "El Erial" de Galeana N. L. y "El Potrero" de Navidad N. L.

##### **3.1.1 Rancho el Bayonero de Arteaga Coahuila.**

Es propiedad del Sr. David Cabello Valdés, esta ubicado en el kilómetro 215 sobre la carretera federal N° 57, tramo Matehuala - Saltillo, con las

coordenadas 25° 15' 41" de latitud Norte y 100° 47' 57" de longitud oeste, con una altitud aproximada de 1960 msnm.

### Clima

El rancho el Bayonero se localiza en una región cuyo clima es: BS<sub>1</sub> kw ( x' ) ( e' ) según la clasificación de Köppen modificada por García, se define como clima semiseco, templado con verano cálido muy extremoso, teniendo una temperatura media anual entre 12.7°C y la temperatura media del mes más frío está entre -3° y 18°C. Los meses más fríos son Diciembre, Enero, Febrero y Marzo, presentándose hasta 74 heladas al año en promedio, las lluvias más abundantes son en Julio y Agosto alcanzando una precipitación promedio anual de 470.6 mm.

### Suelo

El rancho el Bayonero se ubica en una región cuyo suelo se clasifica Castañosem háplico. Son suelos con una profundidad superior a 100 cm, con pendiente de 0 a 1 por ciento, de reacción alcalina, alto contenido de carbonatos, con un contenido de materia orgánica superior al 2 por ciento en los primeros 30 cm de profundidad, con una precipitación pluvial mayor a 350 mm, de acuerdo a tales características y según la séptima aproximación (sistema americano) este suelo se ubica dentro del orden Molisol, suborden Ustolls y gran grupo Argiustolls.

### 3.1.2. Rancho el Venado de Parras Coahuila.

Se localiza geográficamente en las coordenadas 25° 27' 15" latitud norte y 101° 57' 25" longitud oeste, con 1650 msnm, presentando un clima cálido seco.

#### Suelo

El tipo de suelo de esta región es de ( xn/2a ) Xerosol háplico, ( contenido moderado de materia orgánica, con fertilización y mejoradores del suelo son capaces de dar buenas cosechas ) muy permeables con textura media, con una orografía de terreno plano y ligeramente ondulado con pendientes menores de 8 por ciento. Cuenta con terrenos aptos para la agricultura por lo regular por temporal permanente anual.

### **Vegetación**

La vegetación está formada por mezquites *Prosopis sp* , huizaches *Acacia sp*, Gobernadora *Larrea tridentata* y hojasesn *Flaureais cernua* pastos de los géneros *Boutelova* y *Sporobulos*, ocotillo, albarda, maguey, manso, Lechuguilla *Agave lechuguilla*, Gatoño *Acacia romeriana*, Guayule *Parthenium argentatum*, palma *samandoca*, candelilla *Euphobia antisiphylitica*, sotol *Dacylirion spp*, *Yuca carnerosa*, mimbre, palo blanco, fresno, pino, cedro y cactáceas de diferentes variedades.

3.1.3. Rancho el Potrero de Navidad, Nuevo León.

Se localiza en el Ejido de Navidad, Nuevo León geográficamente situado entre las coordenadas 25° 04' 15" latitud norte y 100° 36' 30" longitud oeste del meridiano de Greenwich a 1895 msnm.

### Clima

El clima en la zona es el reportado por Enriqueta García (1964) como BS<sub>1</sub> kw (e') el cual lo describe como semiseco, templado muy extremo con lluvias en verano siendo Julio y Agosto los meses más lluviosos. Según Mendoza (1983) la temperatura media anual es de 14.3 °C con máximas extremas de 40.0 °C en Septiembre y mínimas de -15.0 °C en el mes de Enero. La precipitación media anual es de 365 mm, distribuidos principalmente entre los meses de Abril a Octubre donde ocurre el 78.7 por ciento de la total anual. El periodo libre de heladas es de Abril a Septiembre, aunque ocasionalmente se presentan también en estos meses. La evapotranspiración media mensual es superior a 150 mm, teniendo en invierno valores menores a 100 mm, y alcanzando en Abril y Mayo hasta 200 mm, pero Agosto es el mes con mayor evaporación. Tiene una humedad relativa en promedio de 70 por ciento.

### Geología

Por su origen los suelos de este lugar pertenecen a la era mesozoica del periodo cuaternario, cretácico inferior y el terciario, se caracterizan por ser suelos de textura migajón limoso, de color crema rosado muy claros. Se les localiza en llanos intermontanos o en extensas llanuras. Son de origen aluvial o

coluvial-aluvial. Se clasifican como Xerosoles, presentan contenidos bajos de materia orgánica, estructura en bloques medios a gruesos. Estos suelos sustentan una vegetación natural de pastizal halofito.

#### Suelo

El suelo se considera adecuado para la práctica de agricultura. En cuanto a fertilidad, son suelos medianamente ricos en nitrógeno y materia orgánica suficiente en potasio y pobre de fósforo ( anónimo 1988).

#### Vegetación

Se encuentran pastos y especies con potencial a condiciones adversas de humedad como calabacilla blanca, guayule y nopal, la vegetación en condiciones naturales esta constituida por matorrales bajos, inermes y espinosos; matorrales rosetofilos y matorrales crasicaules, dominando la presencia de gramíneas; este tipo de vegetación presenta características xeromórficas.

#### 3.1.4. Rancho el Erial de Galeana Nuevo León

Se encuentra localizado en las coordenadas 25° 02' 15" latitud norte y 100° 33' latitud oeste del meridiano de Greenwich a 1900 msnm.

#### Clima

En dicha región durante el invierno el clima es templado semiárido el cual consta de una temperatura media de 16.2 °C y una precipitación de 100 a 200 mm. Mientras que en el verano el clima es semiárido con una temperatura

media de 18 a 20 °C y una precipitación de 300 mm. El tipo de suelo es eutrico, calcárico ligeramente salino y de textura media.

### 3.2. Análisis físicos y químicos

Los análisis de laboratorio practicados a las muestras de suelo, se llevaron a cabo en el laboratorio de Química de suelos, del Departamento de Suelos, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

### 3.3. Preparación de las muestras

Para la preparación de las muestras enriquecidas con fósforo. Primero se tamizó el suelo con una malla de 2 mm. Y se tomaron 50 g de cada suelo y se colocaron en recipientes de plástico con tapa y a cada suelo por duplicado se le aplicó 0, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, mg de P · kg<sup>-1</sup>, la fuente de fósforo fue una solución de KH<sub>2</sub> PO<sub>4</sub> H<sub>2</sub>O (fosfato monobásico de potasio) la cual se aplicó a la superficie del suelo, se mezclaron las muestras cuidadosamente y se incubaron a capacidad de campo a 25 °C por 31 días.

Después de la incubación las muestras fueron secadas al aire a la temperatura ambiente, posteriormente se molieron para destruir los terrones y dejarlas en condiciones para realizar las pruebas de adsorción.

Se determinó el fósforo hidrosoluble por el método modificado de Vander Paauw (1971).

Después se determinó el fósforo extractable por el método de Olsen y el método del  $\text{CaCl}_2$  al 0.01 M como agente extractante.

#### 3.4. Metodología para la cuantificación de fósforo

##### 3.4.1. Fósforo hidrosoluble (Método de Vander Paauw)

Se depositan 5 gramos de suelo en un matraz, se agregan  $50 \text{ cm}^3$  de agua destilada y se agita continuamente por 48 horas. Después de este tiempo se filtra, usando un filtro que no absorba ni libere fosfatos, descartando los primeros centímetros cúbicos del filtrado para evitar turbidez. Se toma una alícuota de  $10 \text{ cm}^3$  del filtrado, para determinar colorimétricamente el P remanente (en solución) usando del método de reducción con ácido ascórbico de Watanabe y Olsen (1965).

##### 3.4.2. Fósforo extractable ( Método de Olsen )

En un matraz se ponen 2.5 g de suelo seco, se agrega una cucharada de carbón activado (aprox. 2.0 g), a continuación se añade 50 ml de bicarbonato de sodio (  $\text{NaHCO}_3$  ) 0.5 molar y se coloca en agitación por 30 minutos.

La suspensión se filtra y se toma una alícuota de 5 ml para determinar el fósforo en solución por el método de reducción de ácido ascórbico, Watanabe y Olsen (1965).

#### 3.4.3. Fósforo extractable en solución de $\text{CaCl}_2$ 0.01 Molar

En un matraz se ponen 5 g de suelo a 24 °C con 30  $\text{cm}^3$  de solución extractora de  $\text{CaCl}_2$  0.01 Molar, agitándose por 30 minutos dos veces al día durante seis días. Después de este tiempo la suspensión se filtra y se toma una alícuota de 10  $\text{cm}^3$  para determinar el P en solución por el método colorimétrico de reducción con ácido ascórbico, Watanabe y Olsen (1965).

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Método del fósforo hidrosoluble.



#### 4.1.1. Isotherma de Langmuir

La figura 4.1 representa los valores de adsorción de acuerdo con la ecuación de Langmuir ( $C/x$  contra  $C$ ), utilizada por Olsen y Watanabe en 1957 y López - Hernández y Burnham en 1974. Para los suelos de los ranchos Bayonero, Venado. Potrero, Erial se obtuvo una relación lineal en todo el rango de concentración de P en el equilibrio o en solución, oscilando los valores desde 0 hasta  $5 \times 10^{-4} \text{ Mol} \cdot \text{Lt}^{-1}$ . Las figuras muestran rectas con pendientes negativos, contrariamente a la encontrada por otros autores tales como: Hsu en 1964; Coleman, et al en 1953; López - Hernández et al en 1984; Kua y Mikkelsen en 1979; Alvarado y Cajuste en 1993, Sin embargo, la Ecuación de Langmuir, aquí permite el calculo de los valores de la capacidad máxima de retención ( $b$ ) y la constante de energía de retención ( $k$ ). Estos valores para los suelos bajo estudio se presentan en el cuadro 4.1. La línea recta para cada caso en particular se ajusta para valores de fósforo en equilibrio inferiores a  $0.45 \times 10^{-4} \text{ Mol} \cdot \text{Lt}^{-1}$ .

La capacidad máxima de retención de fósforo sigue el orden Potrero > Bayonero > Venado > Erial, con valores de 294.12, 256.41, 147.06 y 31.45 mg/kg respectivamente. Syers et al en 1973 presentan valores comprendidos entre 73 - 990 mg/kg. para suelos ácidos de Brasil, mientras que Fox et al en 1970 para suelos tropicales de Hawaii encuentra valores de ( $b$ ) superiores a 2,500 mg/kg.

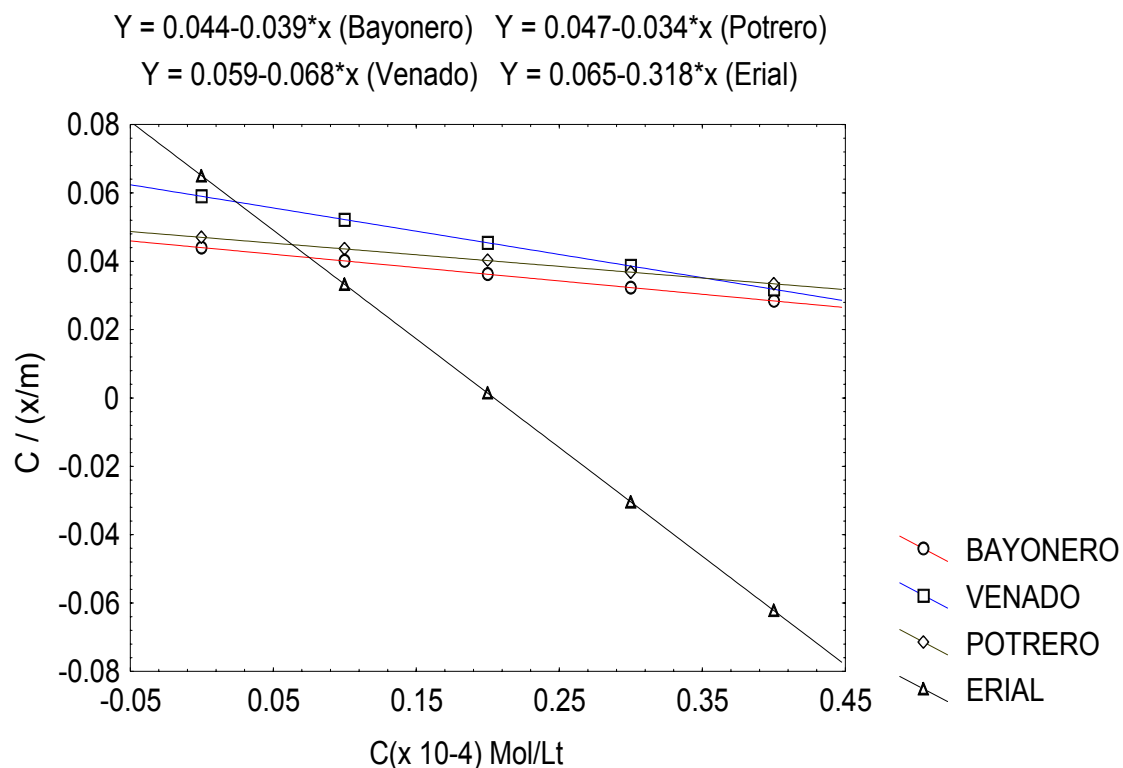


Figura 4.1. Isotermas de adsorción de Langmuir.

Es importante destacar que los valores de la capacidad máxima de retención de fósforo (b) se encuentra íntimamente relacionada con la pendiente de la línea recta de cada suelo, ya que a medida que ésta aumenta, el valor de (b) disminuye y viceversa. Por otro lado, el valor de (k) aumenta conforme se incrementa la pendiente, presentandose un comportamiento contrario a los valores de (b).

**Cuadro 4.1. Capacidad máxima de adsorción de fósforo (b) y constante de energía de retención (k) de los suelos en estudio, valores calculados a partir de la ecuación de Langmuir.**

<b>Localidad</b>	<b>Recta de correlación</b>	<b>Coefficiente de correlación</b>	<b>b mg/kg suelo</b>	<b>m</b>	<b>K</b>
Potrero	$Y = - 0.034X + 0.047$	0.7033	294.12	- 0.034	0.7234
Bayonero	$Y = - 0.039x + 0.044$	0.7344	256.41	- 0.039	0.8864
Venado	$Y = - 0.068x + 0.059$	0.7602	147.06	- 0.068	1.1526
Erial	$Y = - 0.318x + 0.065$	0.6515	031.45	- 0.318	4.8922

López- Hernández et al En 1981, mencionan que la capacidad máxima de retención de aniones es un parámetro estrechamente relacionada con los elementos del complejo adsorbente del suelo; en particular destaca, para suelos ácidos, de las formas activas del hierro, aluminio y manganeso, mientras que para suelos calcáreos la retención se atribuye fundamentalmente a la presencia de calcio, como lo señala Larsen en 1967.

En el cuadro 4.2 se presentan los valores de las características generales de los suelos, si se hace una comparación de los valores correspondientes al contenido de calcio y magnesio con la capacidad máxima de retención se observa, en general, una capacidad íntima entre éstos y la capacidad adsorptiva del suelo, De la misma manera los suelos más arcillosos (Bayonero y Potrero) presentan valores de retención más altos que los constituidos por partículas más gruesas (Venado y Erial).

La materia orgánica, no juega un papel determinante en la capacidad de retención de los suelos, ya que como se ha citado en la literatura, existen discrepancia con relación a este fenómeno el cual se debe a la dualidad de la materia orgánica que puede fijar fosfatos, sobre todo atravez de los complejos calciformes, pero también es conocida la capacidad que tienen los derivados de la materia orgánica para bloquear los sitios de adsorción (López - Hernández et al, 1979; Nagarajah et al, 1968). Por otro lado, si se observan los valores de la constante de energía de retención (k) con el contenido de materia orgánica de los suelos estudiados, se aprecia que existe entre ambas propiedades una cierta tendencia negativa ya que a medida que aumenta el contenido de la materia orgánica el valor de (k) tiende a disminuir, Datta y Srivastava mencionados por López - Hernández indican que para suelos de la India con el mismo nivel de sesquióxidos de fierro y aluminio, la energía de enlaces era menor mientras mayor era el contenido de materia orgánica de dichos suelos, (cuadro 4.2).

Existen algunas características del suelo que influyen en forma notable en la capacidad máxima de retención de fósforo, así para el suelo del Bayonero destacaron la cantidad de arcilla (%) y el pH; en el suelo del Venado el contenido de materia orgánica (%), de bicarbonatos (meq/Lt) y la capacidad de intercambio cationico (meq/100gr); en el suelo del Potrero el porciento de arcilla, la densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) y los carbonatos totales en segundo termino; y en el suelo del Erial destacaron el pH, carbonatos totales, calcio, magnesio, sulfatos, no obstante que su valor de contenido de arcilla es el más bajo, (cuadro 4.2).

**Cuadro 4.2. Capacidad máxima de retención (b), la constante de energía de retención (k) y algunas propiedades de los suelos en estudio.**

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>POTRERO</b>	<b>BAYONERO</b>	<b>VENADO</b>	<b>ERIAL</b>
Capacidad máxima de retención (b)	294.12	256.41	147.06	31.45
Constante de energía de retención( K)	0.7234	0.8864	1.1526	4.8922
pH en agua	7.7	7.8	7.7	7.8
Materia Orgánica (%)	3.0119	2.8404	3.1833	2.4487
Carbonatos totales (%)	20.041	16.161	13.926	25.255
Calcio meq/Lt	12.7	8.5	15.5	24.0
Sulfatos meq/Lt	32.55	28.70	17.13	64.26
Cap.Inter.Cat.(meq/100gr)	66.465	41.734	73.421	68.784
Arena (%)	35.90	10.45	48.10	48.40
Limo (%)	40.35	44.55	29.40	49.10
Arcilla (%)	23.75	45.00	22.50	2.50
Densidad aparente(g/cm <sup>3</sup> )	1.136	1.111	1.087	1.078

#### 4.1.2. Isoterma de Temkin.

Algunos autores como López - Hernández y Burnham en 1974; Bache en 1977 han utilizado las isotermas de adsorción de temkin, las cuales se presentan en la figura 4.2., para los suelos en estudio. El modelo de Temkin se presenta en escala semilogaritmica como (x) los valores de logaritmo de fósforo en solución y en el eje (y) los valores de fósforo adsorbido, expresado como mg de fósforo adsorbidos por cada 1000 g de suelo, esto permite estudiar una más amplia gama de concentraciones de fósforo inicial, como fue el caso de este estudio donde los niveles de fósforo inicial fluctuaron desde 0 hasta 2500 mg/kg. Esta situación es más próxima a la realidad, como la señala López - Hernández et al en 1981, ya que en el sistema suelo coexisten desde

concentraciones de fósforo demasiado pequeñas (0.01 mg/kg) en la solución del suelo hasta valores relativamente altos. En esta investigación el modelo de Temkin se ajustó hasta concentraciones de 6.5 mg de P/kg en solución cuando se trabajo en las diferentes pruebas de adsorción en el laboratorio.

Khasawneh 1971, establece que la capacidad amortiguadora es la habilidad de un suelo para mantener una intensidad de nutrimentos en terminos cuantitativos, la capacidad amortiguadora  $C_b$  se expresa como sigue:

$$C_b = \Delta Q / \Delta I$$

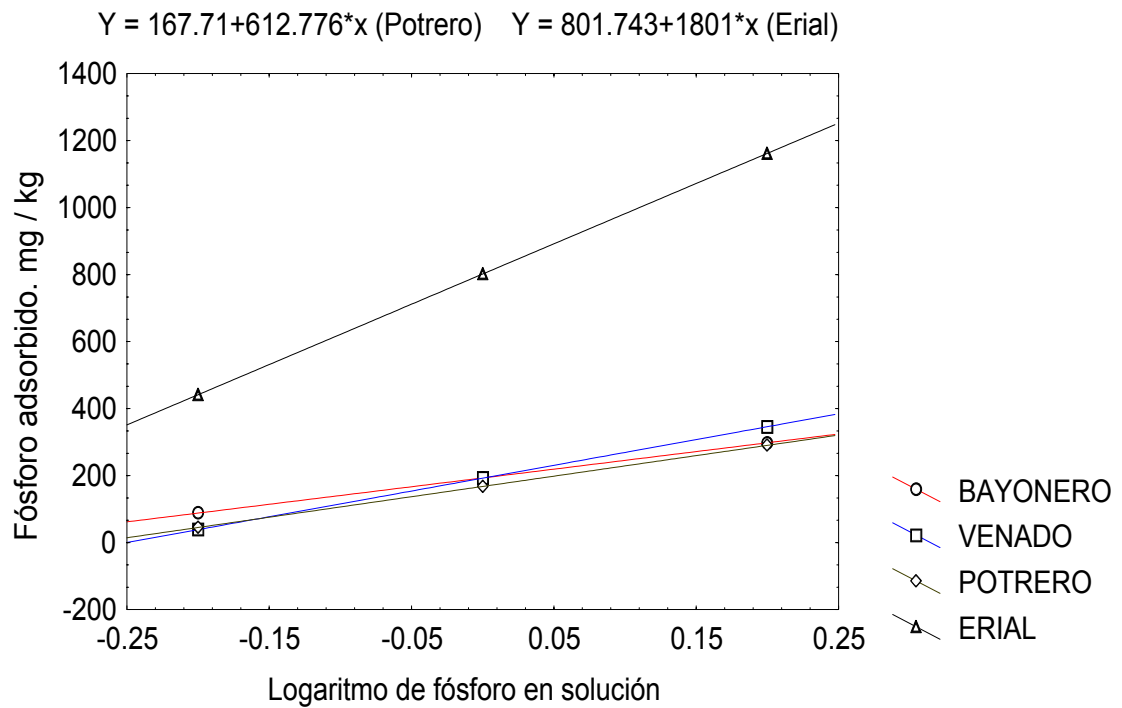


Figura 4.2 Isotermas de adsorción de Temkin.

En la figura 4.2 la pendiente de las rectas representa la capacidad amortiguadora de fosfatos en el suelo, por lo que se establece que la capacidad amortiguadora del Erial > Venado > Potrero > Bayonero con valores de: 1801, 768.035, 612.776 y 524.601 respectivamente.

Olsen y Watanabe en 1970, mencionan que si la capacidad amortiguadora de fosfatos en el suelo es alta, la concentración de fósforo en la solución del suelo puede ser baja y por lo tanto mayor fijación viceversa. El cuadro 4.3, muestra que cuando se aplica suficiente fósforo para que cada suelo logre fijar o adsorber 441.543 mg de fósforo por cada kilogramo de suelo, la concentración de fósforo en la solución del suelo es variable y disminuye conforme aumenta el valor de la pendiente, así que el fósforo en solución sigue el orden siguiente: Erial < Venado < Potrero < Bayonero con valores de 0.631, 2.109, 2.799, 2.979 respectivamente.

**Cuadro 4.3. Fósforo en solución en relación a la pendiente de las isotermas de Temkin, en cuatro localidades.**

Localidad	Pendiente	Fósforo adsorbido $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Logaritmo de P en solución	Fósforo en solución $\text{mg}\cdot\text{Lt}^{-1}$
Erial	1801	441.543	-0.200	0.631
Venado	768.035	441.543	0.324	2.109
Potrero	612.776	441.543	0.447	2.799
Bayonero	524.601	441.543	0.474	2.979

En el cuadro 4.4 se observa que los valores más altos de fósforo en solución corresponden al Venado en los dos primeros niveles de fósforo

adsorbido y al Potrero en los tres siguientes. Solo a partir de 400 mg de P fijado en el suelo obedece el orden de Erial, Venado, Potrero y Bayonero con 0.598, 1.862, 2.393 y 2.477 mg de P·Lt<sup>-1</sup>, respectivamente.

**Cuadro 4.4. Valores de fósforo en solución (mg·Lt<sup>-1</sup>) en función de diferentes niveles de fósforo adsorbido (mg - kg<sup>-1</sup>).**

<b>Fósforo adsorbido mg·kg<sup>-1</sup></b>	<b>Erial</b>	<b>Venado</b>	<b>Potrero</b>	<b>Bayonero</b>
25	0.371	0.605	0.585	0.479
50	0.383	0.653	0.643	0.533
75	0.394	0.703	0.706	0.596
100	0.407	0.759	0.776	0.665
300	0.526	1.380	1.644	1.600
400	0.598	1.862	2.393	2.477
500	0.679	2.518	3.483	3.846

#### 4.2. Método del fósforo en solución de CaCl<sub>2</sub>.

##### 4.2.1. Isotherma de Langmuir.

Al hacer uso de los datos generados por las pruebas de adsorción de fósforo en los diferentes suelos en estudio cuando se utilizo como extractante el



cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) 0.01 M, se observó un bajo grado de ajuste de los datos de fósforo en solución y fósforo adsorbido en el modelo matemático de las Isotermas de Langmuir. Encontrándose valores de coeficiente de correlación ( $r$ ) igual a 0.1442, 0.3246, 0.3865 y 0.6162 por lo que se optó no incluir estos resultados, las ecuaciones y sus respectivas figuras en virtud de su bajo grado de confiabilidad.

#### 4.2.2. Isoterma de Temkin.

En la figura 4.3 se presentan las Isotermas de adsorción de Temkin, las cuales se construyeron con los datos que arrojaron las pruebas de laboratorio, cuando se utilizó el método que incluye el uso de  $\text{CaCl}_2$  al 0.01M como extractante. El modelo de Temkin describe los niveles de fósforo fijado o adsorbido en función de las concentraciones de fósforo en solución de  $\text{CaCl}_2$  al 0.01 M, las cuales fluctuaron desde 0.5 a 2 mg/kg.

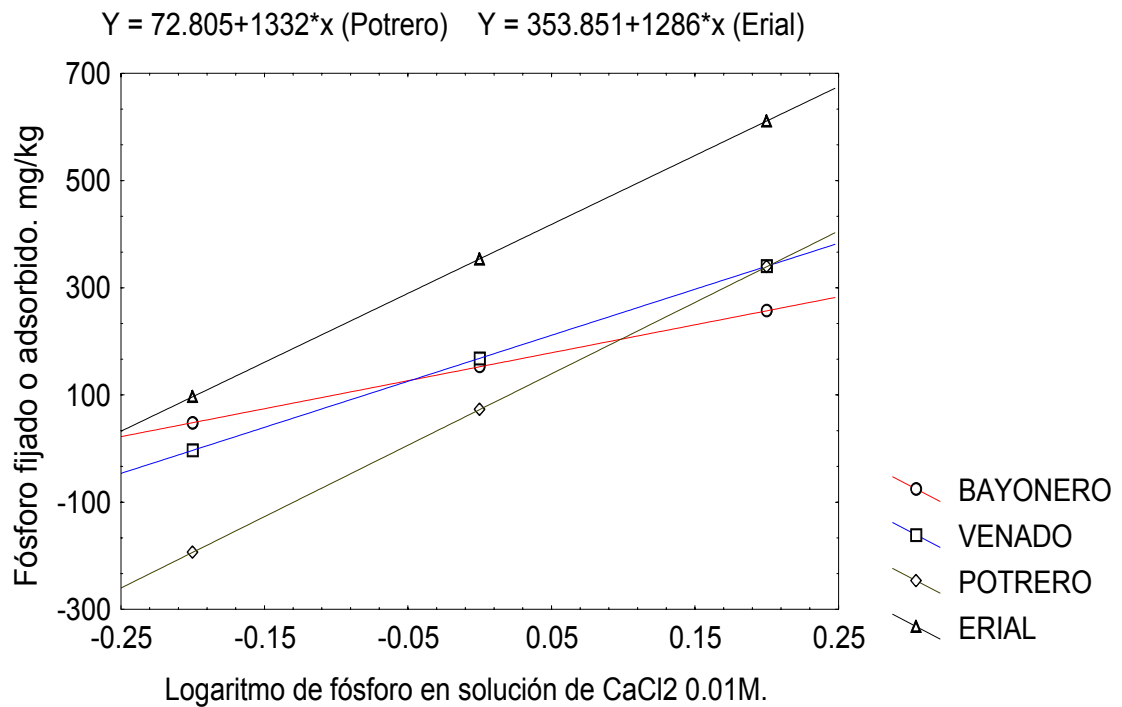


Figura 4.3. Isotherma de adsorción de Temkin.

El cuadro 4.5, muestra las pendientes de las rectas de las Isothermas de Temkin, cuyos valores son: 1332, 1286, 858.74 y 521.73, para el Potrero, Erial, Venado y Bayonero respectivamente. Lo establecido por Olsen y Watanabe en 1970, en el sentido de que si la capacidad amortiguadora de fosfatos en el suelo es alta, la concentración de fósforo en la solución del suelo puede ser baja y viceversa, se cumple en forma parcial, ya que cuando los coloides del suelos adsorben 441.543 mg de fósforo por cada kilogramo de suelo, la concentración de fósforo en la solución del suelo es variable, con valores de: 1.892 (Potrero), 1.169 (Erial), 2.080 (Venado) y 3.581 (Bayonero). Sin embargo, se observa que el suelo del Potrero posee la mayor capacidad amortiguadora y

debería tener la menor concentración de fósforo, pero esto no es así, tal vez debido al tipo de material coloidal del suelo, que si bien adsorbe cierta cantidad de fósforo, también lo pone en solución después de llegar al equilibrio, lo que permite superar al suelo del Erial en este sentido.

**Cuadro 4.5. Fósforo en solución en relación a la pendiente de las isothermas de Temkin, en cuatro localidades.**

Localidad	Pendiente	Fósforo adsorbido $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Logaritmo de fósforo en solución	Fósforo en solución $\text{mg}\cdot\text{Lt}^{-1}$
Potrero	1332.0	441.543	0.277	1.892
Erial	1286.0	441.543	0.068	1.169
Venado	858.74	441.543	0.318	2.080
Bayonero	521.73	441.543	0.554	3.581

En el cuadro 4.6 se observa que en los cuatro primeros niveles de fósforo adsorbido los valores más altos de fósforo en solución corresponden al Potrero y en los tres siguientes al Bayonero. Solo a partir de 400 mg de P fijado en el suelo obedece el orden de Erial, Potrero, Venado y Bayonero con 1.086, 1.762, 1.862 y 2.979 mg de  $\text{P}\cdot\text{Lt}^{-1}$ , respectivamente.

**Cuadro 4.6. Valores de fósforo en solución ( $\text{mg}\cdot\text{Lt}^{-1}$ ) en función de diferentes niveles de fósforo adsorbido ( $\text{mg} - \text{kg}^{-1}$ ).**

Fósforo adsorbido $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Erial	Venado	Potrero	Bayonero
25	0.555	0.681	0.920 *	0.569
50	0.581	0.728	0.962 *	0.635
75	0.607	0.778	1.005 *	0.710
100	0.635	0.832	1.047 *	0.793

300	0.908	1.422	1.483	1.914 *
400	1.086	1.862	1.762	2.979 *
500	1.300	2.432	2.094	4.634 *

#### 4.3. Curvas de desorción de fósforo.

Las curvas de desorción de fósforo se construyen a partir de los datos de fósforo liberado o desorbido ( $\text{mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$  de suelo) en función de los niveles aplicados inicialmente al suelo de fósforo, los cuales fluctuaron desde 0 hasta  $2500 \text{ mg de P} \cdot \text{kg}^{-1}$  de suelo.

La figura 4.4 muestra las curvas de desorción para los cuatro suelos en estudio utilizando el método del fósforo hidrosoluble de Van Der Pauw. Los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio se ajustan a ecuaciones logarítmicas en los cuatro casos, ya que los modelos lineales y exponenciales arrojaban una marcada baja de confiabilidad.

### Fósforo hidrosoluble

$$Y = -21.72 + 15.975 \cdot \log_{10}(x) \text{ (Bayonero)}, Y = -33.974 + 22.316 \cdot \log_{10}(x) \text{ (Potrero)}$$

$$Y = -16.016 + 12.905 \cdot \log_{10}(x) \text{ (Venado)}, Y = 1.981 + 1.257 \cdot \log(x) \text{ (Erial)}$$

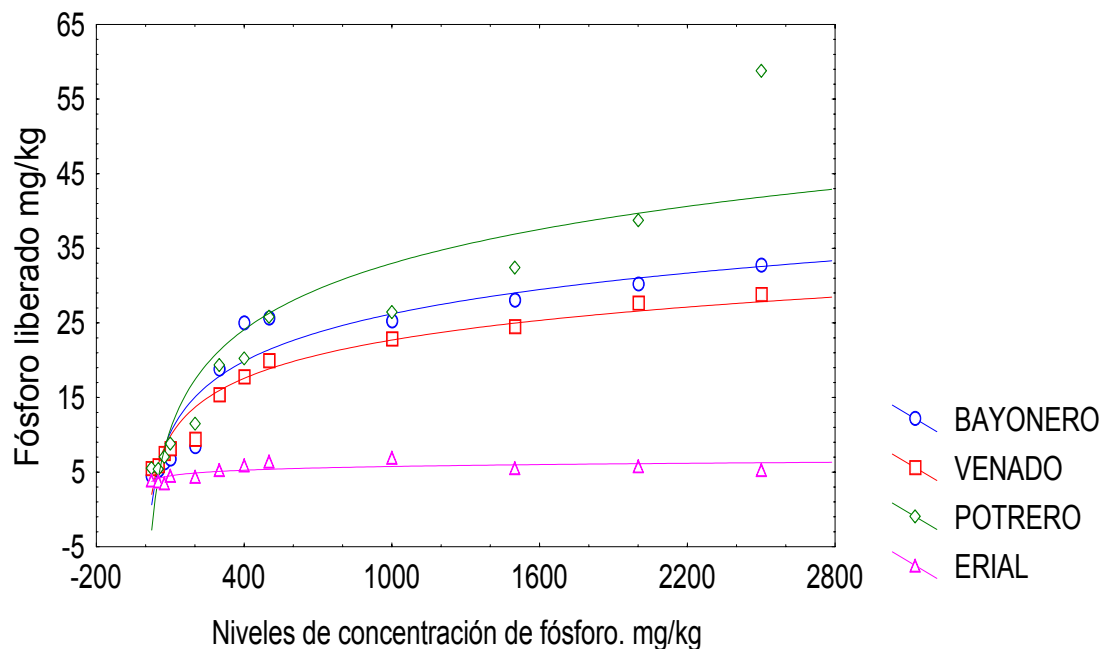


Figura 4.4 Curvas de desorción de fósforo.

Obsérvese que el grado de liberación de fósforo en todo el rango de concentración de fósforo es variable en los cuatro sitios de estudio, ya que cuando se aplica un nivel de 100 mg·kg<sup>-1</sup> de fósforo a cada suelo; el suelo del Potrero libera 10.658 mg de P·kg<sup>-1</sup> de suelo, mientras que los suelos del Bayonero, Venado y Erial liberan menores cantidades de fósforo, como se muestra en el cuadro 4.7.

**Cuadro 4.7. Fósforo liberado (mgP·kg<sup>-1</sup> suelo) en función de cuatro niveles iniciales de fósforo, en los suelos de estudio. Método de fósforo hidrosoluble.**

Localidad	Ecuación de desorción	100 mg/kg	500 mg/kg	1000 mg/kg	1500 mg/kg
Bayonero	$Y = -21.72 + 15.975 \cdot \log_{10}(x)$	~5	~20	~25	~28
Venado	$Y = -16.016 + 12.905 \cdot \log_{10}(x)$	~5	~15	~20	~22
Potrero	$Y = -33.974 + 22.316 \cdot \log_{10}(x)$	~10	~25	~30	~35
Erial	$Y = 1.981 + 1.257 \cdot \log(x)$	~5	~5	~5	~5

Potrero	$Y = -33.974 + 22.316(\log x)$	10.658	26.256	32.974	36.904
Bayonero	$Y = -21.72 + 15.975(\log x)$	10.230	21.396	26.205	29.018
Venado	$Y = -16.016 + 12.905(\log x)$	9.794	18.814	22.699	24.971
Erial	$Y = 1.981 + 1.257(\log x)$	4.495	5.374	5.752	5.973

En el mismo cuadro se observa que los niveles de liberación de fósforo del suelo del rancho el Erial tienen un incremento relativamente pequeño, en todos los niveles de fósforo inicial, aquí la curva presenta una leve curvatura en los niveles bajos de fósforo (0-500 mg de P/kg ) y posteriormente la curva prácticamente se transforma en línea recta desde 500 a 2500 mg P/kg, lo que indica que cuando se aplica desde 500 hasta 2500 mg de P/kg al suelo, la mayoría del elemento es retenido por los coloides del suelo, otra es transformada a compuestos de un alto grado de insolubilidad y no aprovechable por la planta, otra parte es precipitada a los estratos inferiores del suelo y en otros casos lixiviado por la acción de la lluvia o el agua de riego.

El suelo que presenta los mejores valores de fósforo liberado es el Potrero y le sigue los suelos del Bayonero y el Venado. De acuerdo a lo anterior

se puede establecer que el grado de liberación de fósforo de los suelos en estudio, sigue el orden: Potrero > Bayonero > Venado > Erial.

Haciendo uso del método propuesto por Fox y Kampath en 1970, que establece el uso de  $\text{CaCl}_2$  0.01 M como extractante para determinar el fósforo liberado o desorbido del suelo, el cual previamente se enriqueció con diferentes niveles de fósforo inicial, se logró obtener las curvas de desorción de fósforo para los cuatro suelos en estudio, presentándose éstas en la figura 4.5. Los valores de fósforo liberado en función de los niveles de fósforo aplicados al suelo, se ajustaron a modelos matemáticos logarítmicos en los cuatro casos, describiendo todo el rango de concentraciones de fósforo desde 0 hasta  $2500\text{mg P}\cdot\text{kg}^{-1}$  suelo.

Las curvas de la figura 4.5 son muy similares a las descritas en la figura 4.4 del método del fósforo hidrosoluble de Vander Paauw, con la salvedad que la curva de desorción del Erial es más pronunciada en este caso, ya que los valores de P liberado son superiores a los presentados por el método anterior.

### Fósforo extractable en solución de CaCl<sub>2</sub> 0.01M

$$Y = -60.876 + 57.817 \cdot \log_{10}(x) \text{ (Bayonero)}, Y = -58.896 + 55.85 \cdot \log_{10}(x) \text{ (Potrero)}$$

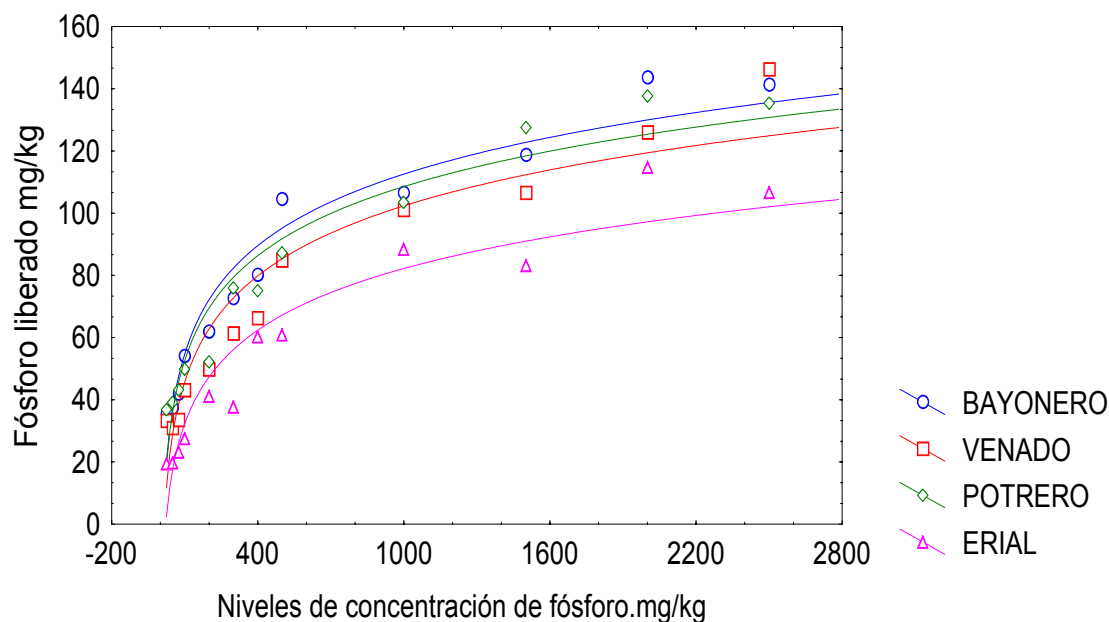


Figura 4.5 Curvas de desorción de fósforo.

El cuadro 4.8 muestra que el grado de liberación de fósforo, por el método de CaCl<sub>2</sub> 0.01M, fué mejor en todos los niveles de fósforo inicial (tratamientos) así como en todos los sitios en comparación con los valores observado por el método hidrosoluble, todo esto en virtud del tipo extractante utilizado en esta parte del experimento, ya que como lo establecen Fox y Kamprath en 1970, el CaCl<sub>2</sub> es idóneo como extractante de fósforo cuando se trabaja con suelos calcáreos, por otro lado es importante señalar que el suelo del Bayonero logra liberar más fósforo que el suelo del Potrero, lo que significa que el grado de liberación de fósforo por este método siguió el orden : Bayonero > Potrero > Venado > Erial, exactamente opuesta a la capacidad amortiguadora de los suelos (descritas por las isotermas de Temkin, figura 4.2),



esto confirma lo establecido por Olsen y Watanabe en 1970, que a mayor capacidad amortiguadora menor contenido de fósforo en las solución del suelo y menor la cantidad de fósforo total liberado y viceversa.

**Cuadro 4.8. Fósforo liberado (mg P·kg<sup>-1</sup>) por el método de CaCl<sub>2</sub> 0.01M, en función de cuatro niveles iniciales de fósforo en los suelos de estudio.**

Localidad	Ecuación de desorción	Fósforo liberado mg P·kg <sup>-1</sup>			
		100	500	1000	1500
Bayonero	Y=-60.876+57.817(log x)	54.758	95.170	112.575	122.756
Potrero	Y=-58.896+55.85(log x)	52.804	91.841	108.654	118.489
Venado	Y=-67.457+56.61(log x)	45.763	85.332	102.654	112.342
Erial	Y=-67.396+49.865(log x)	32.334	67.188	82.199	90.980

## V. CONCLUSIONES

1. La capacidad de adsorción de fósforo para los suelos en estudio fue determinada por el uso de las Isotermas de adsorción, empleándose las ecuaciones de Langmuir y Temkin.
2. De acuerdo al modelo de adsorción de Langmuir se establece que la capacidad máxima de adsorción de fósforo de los suelos varia de acuerdo al orden: Erial, Venado, Bayonero, Potrero con los valores de 31.45, 147.06, 256.41, 294.12 mg de P por kg de suelo, respectivamente.
3. El modelo de adsorción de Temkin establece que hay una relación inversa entre el fósforo en solución y la pendiente de la recta la cual representa la capacidad amortiguadora de fosfatos en el suelo cuyos valores son: 1801 (Erial), 768.035 (Venado), 612.776 (Potrero) y 524.601 (Bayonero).
4. El modelo de adsorción de Langmuir permite el calculo de la capacidad máxima de adsorción de fósforo, la constante de energía de retención y un mayor grado de ajuste del modelo a concentraciones relativamente bajas de fósforo.

5. El modelo de Temkin permite calcular la capacidad amortiguadora del suelo para mantener una intensidad de fósforo en la solución del suelo y un mayor grado de ajuste del modelo desde concentraciones muy bajas hasta aquellas relativamente altas.
6. En suelos calcáreos es recomendable el uso de las Isotermas de adsorción de Temkin, ya que el modelo permite ajustarse a un amplio rango de concentraciones de fósforo en la solución del suelo, sin perder el grado de confiabilidad.
7. Utilizando el método de fósforo hidrosoluble, las curvas de desorción establecen el grado de liberación de fósforo para los cuatro suelos en estudio, definiéndose el orden: Potrero, Bayonero, Venado, Erial.
8. Utilizando el método del fósforo en solución de  $\text{CaCl}_2$  0.01 M, las curvas de desorción presentan un mayor grado de liberación de fósforo para los suelos en estudio de acuerdo al orden: Bayonero, Potrero, Venado, Erial.

## VI. RESUMEN

En los suelos calcáreos de las zonas áridas y semiáridas del norte de México uno de los mayores problemas que presentan es la baja disponibilidad de nutrientes como el fósforo, entre otros, esto es ocasionado por las características químicas propias de los suelos de estas regiones, lo que provoca que los productores utilicen altas cantidades de fertilizantes fosfatado para tratar de eliminar estas deficiencias y obtener así rendimientos aceptables de los cultivos.

El presente trabajo de investigación se realizó con los objetivos de determinar la capacidad de adsorción de fósforo mediante el uso de las isothermas de adsorción y determinar la capacidad de liberación de fósforo por medio de las curvas de desorción, en cuatro suelos calcáreos.

Se efectuaron pruebas de adsorción y desorción de fósforo en el laboratorio de Química de suelos del Departamento de suelos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, definiéndose los siguientes niveles de fósforo: 0, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400, 500, 1000, 1500, 2000 y 2500 mg de P/kg, y utilizándose como fuente de fósforo una solución de

$\text{KH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . Los suelos estudiados fueron de los ranchos El Bayonero, El Venado, El Potrero y El Erial.

Se utilizaron tres métodos de extracción de fósforo, siendo estos el de fósforo hidrosoluble de Vander Paauw, fósforo extractable de Olsen y fósforo extractable en solución de  $\text{CaCl}_2$  0.01 M, las pruebas se corrieron por duplicado. Se emplearon las Isotermas de adsorción de Langmuir y de Temkin para describir los datos de adsorción de fósforo y los datos de las pruebas de desorción fueron descritos por medio de ecuaciones de regresión múltiple logarítmicas.

Las Isotermas de adsorción permitieron calcular los valores de la capacidad máxima de fijación de fósforo, la constante de energía de retención y la capacidad amortiguadora de los suelos, mientras que con las curvas de desorción de fósforo es posible calcular el grado de liberación de fósforo de cada suelo en estudio

## VII. LITERATURA CITADA

- Aldaco, N. R. A. 1989. Uso de isotermas de adsorción para determinar los requerimientos de fósforo en el híbrido AN-430 R de Maíz *Zea mays L.* en suelos calcáreos. Tesis maestría. UAAAN. 133 p.
- Aguilar R.J. 1960. Efecto de los ácidos cítricos, humicos, oxálico y etileno diminetetra acético en la disponibilidad de fósforo nativo en un suelo calcáreo. Tesis profesional ITESM. Monterrey N.L
- Bache, B.W.and E.G. Williams. 1971. A phosphate sorption index for soils. *Journal of Soil Science.* 22:289 - 301
- Bear, E.F. 1955. *Chemistry of the soil* reinhold publishing corp.N.Y.
- Black, C.A. 1968. *Soil fertility plant relationship* second edition. John Wiley and sons incc. N.Y.
- Buehrer, T.H.1932.Arizona agricultural exp. Est. Tech.Bull. 33.154, 212 p.
- Burd, J.J. 1948. Chemistry the phosphate ion in soil system. *Soil Science.*65: 227 - 248
- Cajuste, L..J. 1977. *Química de suelos con enfoque agrícola.* Colegio de postgraduados, Chapingo, México. , p 213-215
- Cajuste, L.J. 1979. Adsorción de fósforo en algunos suelos de origen volcánico de México y su relación con ciertos componentes del suelo. *Agrociencia.* 36: 137-144. Colegio de postgraduados. Chapingo, México
- Chang.S.C and Jackson, M.L.1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science.*84:33-44 R
- Hsu, P.H.1964. Adsorption of phosphata by aluminum and iron in Soils. *Soil Science Society American Procceding.*, p:474-478
- Fassbender, H.W.H y W.T.M.C. George 1950 . Phosphorus in calcareus soil solubilities of native phosphates and fixation of added phosphates. *Soil Science* 70: 441-460

- Fassbender, H.W. 1966. Adsorción de fosfatos en suelos fuertemente ácidos y su evaluación usando la Isoterma de Langmuir. *Fitotecnia Latinoamericana* 3: 206–216
- Fox, R.L and. E.J. Kamprath. 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of Soil. *Soil Science Society American Procceding.* 34: 902–907
- Kardos, L.T.1964. Soil fixation of plant nutrient. Chapter six. *Chemestry of the soil.* Editted by F.E. Bear.
- Larsen, S.1967. Soil phosphorus. *Advances in agronomy.*19:151-210
- Licon, T.L. 1994. Manual de análisis químicos para suelos, agua y planta en suelos calcáreos. FCA y F, UACH.
- López-Hernandez, D.F. Rotondo y T. Herrera. 1984. Isoterma de adsorción de fósforo en suelos de sedimentos del estuario de Maracaibo. *Turrialba* vol. 34 N° 3:353-358.
- MC.Lean, E.O. and Logan T.J.1970. Partially acidulated rock phosphate as source of phosphorus to plant growth chamber estudies. *Soil Science Society American Procceding.* 28:545-550.
- Olsen, S.R. y F.S Watanabe 1957. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by the Langmuir isotherm. *Soil Science Society American Proccedings* vol. 21: 144 - 149.
- Ortega, T.E.1970. Notas del curso de química de suelos E.N.A. Chapingo. México.
- Ortega, R.M.M. 1986. Evaluación de métodos químicos para predecir el requerimiento de fertilizante fosfatado del cultivo de papa *Solanum tuberosum* L. en un suelo calcáreo con o sin perlita. Tesis Maestría. UAAAN. Saltillo, Coahuila México. 124 p.
- Ortiz, V.B y C.A Ortiz. S. 1980. Edafología. Universidad Autónoma Chapingo. México. 290 p.
- Ortiz, V.B y Ortiz S,C.A. 1990. Edafología. Septima edición Chapingo México. 189 p.
- Peña, O.B.1975. El comportamiento de fósforo en suelos calcáreos. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Primo. Y. E. y Carrasco, J.M.1973. Química agrícola 1: Suelos y Fertilizantes. Primera edición, Editorial Alhambra. Madrid, España. 472 p.

Rivero, O.P.1988. Efecto del azufre elemental y estiércol bovino sobre la disponibilidad del fósforo y hierro en suelos calcáreos de Tamaulipas. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.

Singh, B.B. y J.P. Jones. 1977. Phosphorus sorption isotherm for evaluating phosphorus requirements of lettuce at five temperature regimes. Plant and soil 46:31-44 p.

Stewart, J. y MC Kercher, R.B.1983. Phosphorus cyclin in soils agronomic considerations. Actes du 3 eme congress international sur les composes phosphores, IMPHOS. 551 - 565. Bruxeles.

Solís, M.M. y Cajuste, L . 1992. Efectos de algunas características químicas del suelo sobre el fósforo extraído por cuatro métodos. Memoria congreso nacional de la ciencia del suelo. Acapulco Gro. 75 p.

Terman, G.L. and Englestadt, O.P. 1970. Comercial fertilizers 112: 30-36.40 p. In Hignet, T.P. Recent, advances in fertilizer technology fertilizers new vol. 15. (1) Jan 70.

Tisdale, L.S. y Nelson W.L.1970. Fertilidad de suelos y fertilizantes. Editores Montaner y Simón; Barcelona, España. 227 - 230 p.

Teusher, H y Adler, R.1979. El suelo y su fertilidad. Editorial Continental S.A México.

**Udo, E.J.y F.O Uzu. 1972. Characteristics of phosphorus adsorption by some Nigeria soil. Soil Science Society American Proceedings vol. 36: 879 - 883 p.**

Veith, J.A. and R.J. Sposito. 1977. On the use of the Langmuir equation in the interpretation of "adsorption" phenomena. Soil Science Society American Proceedings. 41:697-702 p.

Webb, J.R, Pesk, J.T. and Eik, K. 1961. An evaluation of phosphorus, fertilizer vragag in water solubility oat fertilización. Soil Science Society American Proceedings. 25:22-226 p.

Woodruff, J.R. and E.J. Kamprath. 1965. Phosphorus adsorption maximum as measured by the Langmuir isotherm and its relationship to phosphorus availability. Soil Science Society American Proceedings. 29:148-150 p.



## APENDICE

### Fósforo Hidrosoluble. Rancho el Bayonero

Conc. P	Absor.	P. extract.	P. rem.	Log P rem.	P suelo
0	0.93	0.1677	0.4193	- 0.3775	4.193
25	0.100	0.1811	0.4528	- 0.3441	4.528
50	0.116	0.2118	0.5295	- 0.2761	5.295
75	0.136	0.2502	0.6255	- 0.2038	6.255
100	0.147	0.2714	0.6785	- 0.1685	6.785
200	0.182	0.3386	0.8465	- 0.0724	8.465
300	0.398	0.7534	1.8835	0.2750	18.835
400	0.528	1.0031	2.5078	0.3993	25.078
500	0.540	1.0261	2.5653	0.4091	25.653
1000	0.534	1.0146	2.5365	0.4042	25.365
1500	0.590	1.1221	2.8053	0.4480	28.053
2000	0.636	1.2105	3.0262	0.4809	30.262
2500	0.690	1.3142	3.2855	0.5166	32.855

### Rancho el Venado. Fósforo Hidrosoluble

Conc. P	Absor.	P. Extract.	P. rem.	Log P rem.	P. Suelo
0	0.117	0.2138	0.5345	- 0.2721	5.3450
25	0.121	0.2214	0.5535	- 0.2569	5.535
50	0.129	0.2368	0.5920	- 0.2277	5.920
75	0.163	0.3021	0.7553	- 0.1219	7.553
100	0.176	0.3271	0.8178	- 0.0874	8.178
200	0.204	0.3808	0.9520	- 0.0214	9.520
300	0.328	0.6190	1.5475	0.1896	15.475
400	0.378	0.7150	1.7875	0.2522	17.875
500	0.422	0.7995	1.9988	0.3008	19.988
1000	0.484	0.9186	2.2965	0.3611	22.965
1500	0.516	0.9800	2.4500	0.3892	24.500
2000	0.582	1.1068	2.7670	0.4420	27.670
2500	0.606	1.1529	2.8823	0.4597	28.823

Fósforo Hidrosoluble. Rancho el Potrero

Conc. P	Absor.	P. Extract	P. rem.	Log P rem.	P. Suelo
0	0.103	0.1869	0.4673	- 0.3304	4.6730
25	0.121	0.2214	0.5535	- 0.2569	5.535
50	0.118	0.2157	0.5393	- 0.2682	5.393
75	0.152	0.2810	0.7025	- 0.1534	7.025
100	0.189	0.3520	0.8800	- 0.0555	8.800
200	0.245	0.4596	1.1490	0.0603	11.490
300	0.410	0.7765	1.9413	0.2881	19.413
400	0.428	0.8110	2.0275	0.3070	20.275
500	0.544	1.0338	2.5845	0.4124	25.845
1000	0.558	1.0607	2.6518	0.4235	26.518
1500	0.680	1.2950	3.2375	0.5102	32.375
2000	0.812	1.5485	3.8713	0.5879	38.713
2500	1.230	2.3513	5.8783	0.7693	58.783

Fósforo Hidrosoluble. Rancho el Erial

Conc. P	Absor.	P. Extrac.	P. Remant	Log P rem.	P Suelo
0	0.084	0.150	0.3760	- 0.4248	3.760
25	0.087	0.1561	0.3903	- 0.4086	3.903
50	0.085	0.1523	0.3808	- 0.4193	3.808
75	0.080	0.1427	0.3568	- 0.4476	3.568
100	0.100	0.1811	0.4528	- 0.3441	4.528
200	0.098	0.1773	0.4433	- 0.3533	4.433
300	0.117	0.2138	0.5345	- 0.2721	5.345
400	0.129	0.2368	0.5920	- 0.2277	5.920
500	0.139	0.2560	0.6400	- 0.1938	6.400
1000	0.142	0.2771	0.6928	- 0.1594	6.928
1500	0.120	0.2195	0.5488	- 0.2606	5.488
2000	0.127	0.2331	0.5828	- 0.2345	5.828
2500	0.115	0.2099	0.5248	- 0.2800	5.248

Fósforo Extractable, Método de Olsen. Rancho el Bayonero

Conc. P	Absor	P.Extract	P.rem.	Log P.rem	P.Suelo
0	0.158	0.2925	1.4625	0.0165	29.2500
25	0.192	0.3578	1.7890	0.2526	35.7800
50	0.201	0.3751	1.8755	0.2731	37.5100
75	0.224	0.4192	2.0960	0.3214	41.9200
100	0.288	0.5422	2.7110	0.4331	54.2200
200	0.329	0.6209	3.1045	0.4920	62.0900
300	0.384	0.7265	3.6325	0.5602	72.6500
400	0.424	0.8033	4.0165	0.6038	80.3300
500	0.550	1.0453	5.2265	0.7182	104.5300
1000	0.562	1.0684	5.3420	0.7277	106.8400
1500	0.624	1.1874	5.9370	0.7736	118.7400
2000	0.754	1.4371	7.1855	0.8565	143.7100
2500	0.742	1.4141	7.0705	0.8495	141.4100

Fósforo Extractable, Método de Olsen. Rancho el Venado

Conc. P	Absor	P.Extrac.	P. rem.	Log P rem.	P.Suelo
0	0.104	0.1888	0.9440	- 0.0250	18.88
25	0.180	0.3347	1.6735	0.2236	33.47
50	0.168	0.3117	1.5585	0.1927	31.17
75	0.181	0.3367	1.6835	0.2262	33.67
100	0.231	0.4327	2.1635	0.3352	43.27
200	0.265	0.4980	2.4900	0.3962	49.80
300	0.326	0.6151	3.0755	0.4879	61.51
400	0.352	0.6651	3.3255	0.5219	66.51
500	0.448	0.8494	4.2470	0.6281	84.94
1000	0.532	1.0108	5.0540	0.7036	101.08
1500	0.562	1.0684	5.3420	0.7277	106.84
2000	0.662	1.2604	6.3020	0.7995	126.04
2500	0.752	1.4333	7.1665	0.8553	143.33

Fósforo Extractable, Método de Olsen. Rancho el Potrero

Conc. P	Absor	P.Extract	P.remant	Log P.rem	P.Suelo
0	0.155	0.2867	1.4335	0.1564	28.6700
25	0.197	0.3674	1.8370	0.2641	36.7400
50	0.210	0.3924	1.9620	0.2927	39.2400
75	0.230	0.4308	2.1540	0.3332	43.0800
100	0.265	0.4980	2.4900	0.3962	49.8000
200	0.283	0.5326	2.6630	0.4254	53.2600
300	0.402	0.7611	3.8055	0.5804	76.1100
400	0.396	0.7496	3.7480	0.5738	74.9600
500	0.460	0.8725	4.3625	0.6397	87.2500
1000	0.544	1.0338	5.1690	0.7134	103.3800
1500	0.670	1.2758	6.3790	0.8048	127.5800
2000	0.722	1.3757	6.8785	0.8375	137.5700
2500	0.712	1.3565	6.7825	0.8314	135.6500

Fósforo Extractable, Método de Olsen. Rancho el Erial

Conc. P	Absor	P.Extrac	P.remant	Log P.rem	P. Suelo
0	0.102	0.1849	0.9245	- 0.0341	18.490
25	0.107	0.1945	0.9725	- 0.0121	19.4500
50	0.108	0.1965	0.9825	- 0.0077	19.6500
75	0.127	0.2330	1.1650	0.0663	23.3000
100	0.149	0.2752	1.3760	0.1386	27.5200
200	0.220	0.4116	2.0580	0.3134	41.1600
300	0.202	0.3770	1.8850	0.2753	37.7000
400	0.320	0.6036	3.0180	0.4797	60.3600
500	0.323	0.6094	3.0470	0.4839	60.9400
1000	0.466	0.8840	4.4200	0.6454	88.4000
1500	0.424	0.833	4.1650	0.6196	83.3000
2000	0.604	1.149	5.7450	0.7593	114.9000
2500	0.562	1.0684	5.3420	0.7277	106.8400

Fósforo Extractable con CaCl<sub>2</sub>, Rancho el Bayonero

Conc P	Absor	P.Extract.	P. rem.	Log P rem.	P.Suelo
--------	-------	------------	---------	------------	---------

0	0.092	0.1657	0.4143	- 0.3827	4.1425
25	0.099	0.1792	0.4480	- 0.3487	4.4800
50	0.093	0.1677	0.4193	- 0.3775	4.1925
75	0.095	0.1715	0.4288	- 0.3677	4.2875
100	0.025	0.0371	0.0928	- 0.0325	0.9275
200	0.174	0.3232	0.8080	- 0.0926	8.0800
300	0.215	0.4020	1.0050	0.0022	10.0500
400	0.232	0.4346	1.0865	0.0360	10.8650
500	0.236	0.2303	0.5758	0.2397	5.7575
1000	0.231	0.4327	1.0818	0.0341	10.8175
1500	0.212	0.3962	0.9905	- 0.0041	9.9050
2000	0.184	0.3424	0.8560	- 0.0675	8.5600
2500	0.187	0.3482	0.8705	- 0.0602	8.7050

Fósforo Extractable CaCl<sub>2</sub>, Rancho el Venado

Conc.P	Absor	P. extrac	P. remant	Log p. rem	P Suelo
0	0.087	0.1561	0.3903	- 0.4086	3.9030
25	0.089	0.1600	0.4000	- 0.3979	4.0000
50	0.087	0.1561	0.3903	- 0.4086	3.9030
75	0.078	0.1389	0.3473	- 0.4593	3.4730
100	0.088	0.1581	0.3953	- 0.4031	3.9530
200	0.108	0.1965	0.4913	- 0.3087	4.9130
300	0.160	0.2963	0.7408	- 0.1303	7.4080
400	0.200	0.3732	0.9330	- 0.0301	9.3300
500	0.251	0.4711	1.1778	0.0711	11.7780
1000	0.234	0.4385	1.0963	0.0399	10.9630
1500	0.250	0.4692	1.1730	0.0693	11.7300
2000	0.210	0.3924	0.9810	- 0.0083	9.8100
2500	0.336	0.6343	1.5858	0.2002	15.8580

Fósforo Extractable CaCl<sub>2</sub>, Rancho el Potrero

Conc. P.	Absor	P. Extract	P. Rem.	Log. P rem	P. Suelo
0	0.108	0.1965	0.4913	- 0.3087	4.9125

25	0.098	0.1773	0.4433	- 0.3533	4.4330
50	0.111	0.2022	0.5055	- 0.2963	5.0550
75	0.113	0.2061	0.5155	- 0.2878	5.1550
100	0.124	0.2272	0.5680	- 0.2457	5.6800
200	0.120	0.2195	0.5488	- 0.2606	5.4875
300	0.162	0.3002	0.7505	- 0.1246	7.5050
400	0.187	0.3482	0.8705	- 0.0602	8.7050
500	0.221	0.4135	1.0338	0.0144	10.3375
1000	0.171	0.3175	0.7938	- 0.1003	7.9375
1500	0.177	0.3290	0.8225	- 0.0849	8.2250
2000	0.170	0.3155	0.7888	- 0.1030	7.8875
2500	0.138	0.2541	0.6353	- 0.1970	6.3525

Fósforo Extractable CaCl<sub>2</sub>, Rancho el Erial

Conc. P	Absor.	P. extract	P. rem.	Log.P rem	P. Suelo
0	0.087	0.1561	0.3903	- 0.4086	3.9025
25	0.087	0.1561	0.3903	- 0.4086	3.9025
50	0.088	0.1581	0.3953	- 0.4031	3.9525
75	0.082	0.1465	0.3663	- 0.4362	3.6625
100	0.084	0.1504	0.3760	- 0.4248	3.7600
200	0.089	0.1600	0.4000	- 0.3979	4.000
300	0.079	0.1408	0.3520	- 0.4535	3.5200
400	0.086	0.1542	0.3855	- 0.4140	3.8550
500	0.090	0.1619	0.4048	- 0.3928	4.0475
1000	0.092	0.1657	0.4143	- 0.3827	4.1425
1500	0.090	0.1619	0.4048	- 0.3928	4.0475
2000	0.088	0.1581	0.3953	- 0.4031	3.9525
2500	0.087	0.1561	0.3790	- 0.4214	3.7900