

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
INSTITUTO DE ZOOLOGÍA TROPICAL



EFFECTO DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS Y LA ROCA FOSFÓRICA SOBRE LA
ADSORCIÓN DE P EN SUELOS ÁCIDOS DE SABANAS DE PEDOGÉNESIS
CONTRASTANTES

Trabajo Especial de Grado
Presentado Ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela por la Bachiller
Valera Nancy, como requisito
para optar al Título de
Licenciada en Química

Caracas, Abril 2009

Los abajo firmantes designados por la Universidad Central de Venezuela, como integrantes del jurado examinador del Seminario de Investigación titulado: "EFECTO DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS Y LA ROCA FOSFÓRICA SOBRE LA ADSORCIÓN DE P EN SUELOS ÁCIDOS DE SABANAS DE PEDOGÉNESIS CONTRASTANTES". Presentado por la Br. Nancy Valera, certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por el Reglamento de Trabajo Especial de Grado de la Escuela de Química.

Prof. Alonso D. Ojeda
(Tutor)

Prof. Danilo López Hernández
(Tutor)

Prof. Edgardo Leal
(Jurado)

Prof. Manuel Martínez
(Jurado)

RESUMEN

En el presente trabajo se estableció un diseño experimental para estudiar los cambios de adsorción de fósforo en presencia de roca fosfórica y emulsiones asfálticas de rompimiento lento (catiónica y aniónica), en suelos ácidos de pedogénesis contrastantes ubicados en el estado Guárico (Estación Experimental la Iguana).

Se encontró que la presencia de las emulsiones afectó notablemente la adsorción de fosfato y este efecto dependió de la manera en la cual fue añadido el fosfato y la emulsión; sin embargo no se observaron diferencias en la disminución de P, entre la emulsión catiónica y la aniónica. Por otra parte, la fertilización de los suelos junto a la aplicación de las emulsiones con un período de incubación de 10 días disminuyeron marcadamente la adsorción de P, por la combinación de efectos por parte de la roca fosfórica y las emulsiones.

Es posible explicar las secuencias de adsorción obtenidas tomando en consideración que el efecto de la emulsión sobre la adsorción del fosfato, no se debe a una simple competencia por los sitios activos de adsorción, sino que hay en juego otros factores, como: el posible efecto bloqueador que ejercen los surfactantes cuando se desprenden de las emulsiones; el tiempo y la temperatura los cuales juegan un papel importante en el rompimiento de las emulsiones; la fertilización ya que por medio de ella se puede disminuir el aluminio y el hierro, los cuales retienen e inmovilizan el P que puede ser usado por las plantas.

El fenómeno de adsorción se estudió, obteniendo isotermas de adsorción a partir de concentraciones bajas de P (0, 20, 40, 50, 60, 80 y 100) $\mu\text{g/g}$. Al graficar la concentración de P en el equilibrio contra el P adsorbido, la tendencia de los resultados experimentales se ajustó mejor al modelo de Langmuir, mostrando una disminución en la cantidad de fósforo adsorbido con los tratamientos aplicados.

AGRADECIMIENTO

Que difícil es dar gracias cuando se tiene tanto y a tantas personas que agradecer. Comenzare por dar las gracias a Dios Padre, Hijo y Espíritu Santo. Gracias Señor, porque tu eres fiel y para siempre es tu misericordia, porque tu eres mi vida, mi camino y mi verdad. Sin ti no hubiese podido lograr, lo que hace un tiempo fue un sueño y ya hoy se convierte en realidad, ser una profesional.

A mi querida madre, quien con su esfuerzo y dedicación fueron pilares indispensables, no solo en la culminación de esta etapa sino a lo largo de mi vida. Gracias mami por tu comprensión, esmero y amor, sin tu apoyo incondicional no hubiese podido alcanzar este sueño, que es tanto mío como tuyo. Lo logramos y TE QUIERO MUCHO.

A mi padre, gracias por animarme a seguir cuando sentía que ya no podía, por tu amor, atención y comprensión, TE QUIERO MUCHO.

A mis hermanas: Neida, Joseiris y Valentina, las quiero mucho y gracias por estar siempre a mi lado y apoyarme.

A todos los miembros de mi familia, que de una u otra forma participaron en la realización de este proyecto y a lo largo de este camino recorrido, muchas gracias por todo su apoyo y amor. Los quiero mucho.

A mis compañeros del Laboratorio de Estudios Ambientales del Instituto de Zoología Tropical, gracias por todos los momentos compartidos y la experiencia recabada en esos momentos: Mérida, Edgar, Jorge y Silvana.

A mis amigas que han estado conmigo a lo largo de la carrera, gracias por tantos momentos lindos e inolvidables: Andreina, Erika, Hecmily, Nallybe, Lina, Kristell, Ibelice y Mariela. A mis amigas de siempre y que a pesar de la distancia han estado siempre ahí, en las buenas y en las malas, gracias por ser mis amigas incondicionales y recuerden que las quiero mucho: Tuly, Mérida y Esmeralda.

A Johan, gracias corazón por tu paciencia, amor, comprensión y apoyo. Fuiste uno de los apoyos más grandes que tuve en la realización de este proyecto. TE AMO.

A los Profesores Alonso y Danilo López, muchas gracias por haber confiado en mí y por sus valiosos consejos y sugerencias aportadas durante todo el trabajo.

Al Profesor Carlos Barrios y William Meléndez, por todo su apoyo y ayuda prestada.

Por último, quiero agradecerle a la Universidad Central Venezuela, por haberme dado la oportunidad de realizar mi sueño y por haberme acobijado durante todo este tiempo.

Muchas gracias a todos, porque sin ustedes no hubiese podido lograrlo. Que Dios los bendiga hoy y siempre.

ÍNDICE GENERAL

	PAG.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y ANTECEDENTES	6
1.1 EL SUELO.....	7
1.1.1 Propiedades de los suelos	10
1.1.2 Coloides de los suelo.....	11
1.1.3 Formación de las arcillas en los suelos	18
1.1.4 Suelos ácidos de sabanas.....	21
1.1.5 Papel de la materia orgánica en la fertilidad de los suelos.....	23
1.2 EL FÓSFORO	29
1.2.1 Propiedades químicas	29
1.2.2 Importancia del fósforo en las plantas.....	30
1.2.3 Formas del fósforo en el suelo.....	30
1.2.4 Roca fosfórica.....	35
1.2.5 Ciclo del fósforo.....	36
1.2.6 Dinámica del fósforo y principales reacciones	38
1.2.7 Adsorción de fosfatos en los suelos.....	42
1.2.7.1 Isotermas de adsorción de P.....	44
1.3 ENMIENDAS ORGÁNICAS E INORGÁNICAS.....	49
1.4 EMULSIONES ASFÁLTICAS.....	52
1.5 ANTECEDENTES	56
1.5.1 Adsorción de fósforo en los suelos.....	56
1.5.2 Emulsiones asfálticas	59
OBJETIVOS	63
CAPÍTULO II. PARTE EXPERIMENTAL.....	64
2.1 Zona de estudio.....	65
2.1.1 Ubicación Geográfica.....	65

2.1.2	Clima	66
2.1.3	Litología.....	67
2.1.4	Suelos.....	67
2.1.5	Bioma y Vegetación.....	68
2.2	Metodología Experimental.....	69
2.2.1	En Campo.....	69
2.2.1.1	Muestreo.....	69
2.2.2	En el Laboratorio.....	69
2.2.2.1	Características de las emulsiones asfálticas y de la roca fosfórica.....	70
2.2.2.2	Pre-tratamiento de la muestra.....	70
2.2.2.3	Diseño Experimental (Tratamientos) y Métodos de Análisis en el laboratorio	71
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	76
3.1	Análisis físico- químico de los suelos.....	76
3.2	Isotermas control de adsorción de P en ausencia de emulsión (IC).....	76
3.3	Isotermas de adsorción de P en presencia de las emulsiones asfálticas	82
3.3.1	Isotermas de adsorción en las que se incorpora primeramente el P y luego la emulsión.....	82
3.3.2	Isotermas de adsorción en las que se incorpora primeramente la emulsión y luego el P.....	85
3.3.3	Isotermas de adsorción en las que se incorpora primeramente las emulsiones con un período de incubación de 10 días y luego el P.....	88
3.3.4	Isotermas de adsorción en las que se incorpora simultáneamente las emulsiones y el P.....	91
3.4	Coeficientes derivados de Langmuir.....	103

4	EFFECTO DOSIS.....	108
5	CONCLUSIONES.....	110
6	RECOMENDACIONES.....	112
BIBLIOGRAFÍA		113
ANEXOS.....		122
APENDICE.....		131

ÍNDICE DE FIGURAS

	PAG.
Figura 1. Componentes del suelo.....	7
Figura 2. Rango de tamaños de las partículas coloidales y comparación con los tamaños de otros elementos presentes en los suelos	12
Figura 3. Distribución esquemática de las cargas negativas en la superficie de un mineral arcilloso y de los cationes compensantes	13
Figura 4. Modelo de la doble capa difusa. La vista izquierda muestra el cambio en la densidad de carga alrededor del coloide. La derecha muestra la distribución de iones positivos y negativos alrededor del coloide.....	16
Figura 5. Esquema de la materia orgánica en el suelo.....	24
Figura 6. Reacciones en las que intervienen los fosfatos en el sistema suelo-planta.....	32
Figura 7. Reacciones en las que intervienen los fosfatos en el sistema suelo-planta	34
Figura 8. Ciclo del fósforo	37
Figura 9. Proceso de transporte de fósforo en suelo	38
Figura 10. Isoterma de Freundlich	45
Figura 11. Isoterma de Langmuir.....	46
Figura 12. Isotermas de Temkin a diferentes pH y temperaturas.....	49
Figura 13. Ubicación Geográfica de la Estación Experimental la Iguana (Google Earth).....	66
Figura 14. Isotermas control del Ultisol y el Entisol.....	77
Figura 15. Isotermas control del Ultisol roca fosfórica y el Entisol roca fosfórica....	78
Figura 16. Isotermas control de los suelos de estudio.....	78
Figura 17. Mecanismo de intercambio aniónico del ión (H_2PO_4^-) propuesto por Mott ^[86]	80

Figura 18. Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero el P y luego las emulsiones, en el Ultisol control.....	82
Figura 19. Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero el P y luego las emulsiones, en el Ultisol roca fosfórica.....	83
Figura 20. Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero el P y luego las emulsiones, en el Entisol control.....	83
Figura 21. Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero el P y luego las emulsiones, en el Entisol roca fosfórica.....	84
Figura 22. Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero las emulsiones y luego el P, en el Ultisol control.....	86
Figura 23. Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero las emulsiones y luego el P, en el Ultisol roca fosfórica.....	86
Figura 24. Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero las emulsiones y luego el P, en el Entisol control.....	87
Figura 25. Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero las emulsiones y luego el P, en el Entisol roca fosfórica.....	87
Figura 26. Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero las emulsiones con un período de incubación de 10 días y luego el P, en el Ultisol control.....	89
Figura 27. Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero las emulsiones con un período de incubación de 10 días y luego el P, en el Ultisol roca fosfórica....	89
Figura 28. Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero las emulsiones con un período de incubación de 10 días y luego el P, en el Entisol control.....	90
Figura 29. Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero las emulsiones con un período de incubación de 10 días y luego el P, en el Entisol roca fosfórica.....	90
Figura 30. Isotermas de adsorción en las que se incorpora simultáneamente las emulsiones con el P, en el Ultisol control.....	92
Figura 31. Isotermas de adsorción en las que se incorpora simultáneamente las emulsiones con el P, en el Ultisol roca fosfórica.....	92

Figura 32. Isotermas de adsorción en las que se incorpora simultáneamente las emulsiones con el P, en el Entisol control.....	93
Figura 33. Isotermas de adsorción en las que se incorpora simultáneamente las emulsiones con el P, en el Entisol roca fosfórica.....	93
Figura 34. Esquema del mecanismo de nucleación de asfaltenos en presencia de partículas sólidas.....	95
Figura 35. Simulación del rompimiento de una emulsión asfáltica catiónica.....	98
Figura 36. Esquema hipotético propuesto para la interacción suelo-emulsión catiónica.....	98
Figura 37. Simulación del rompimiento de una emulsión asfáltica aniónica.....	99
Figura 38. Esquema hipotético propuesto para la interacción suelo- emulsión aniónica.....	99

ÍNDICE TABLAS

	PAG.
Tabla 1. Clasificación de sedimentos y rocas clásticas presente en la fracción inorgánica de los suelos	8
Tabla 2. Valores de pH_o para algunos minerales presentes en el suelo	17
Tabla 3. Grupos funcionales superficiales más importantes de las sustancias húmicas.....	27
Tabla 4. Datos químicos del Fósforo.....	29
Tabla 5. Diseño experimental.....	71
Tabla 6. Caracterización general de los suelos.....	76
Tabla 7. Valores de pH de las isothermas control.....	79
Tabla 8. Valores de pH de las isothermas de adsorción en las que se incorpora primeramente el P y luego la emulsión.....	85
Tabla 9. Valores de pH de las isothermas Isothermas de adsorción en las que se incorpora primeramente la emulsión y luego el P.....	88
Tabla 10. Valores de pH de las isothermas de adsorción en las que se incorpora primeramente las emulsiones con un período de incubación de 10 días y luego el P.....	91
Tabla 11. Valores de pH de las isothermas de adsorción en la que se incorpora simultáneamente las emulsiones y luego el P.....	94
Tabla 12. Valores de la emulsión catiónica relacionados a la ecuación lineal de Langmuir y de la recta.....	104
Tabla 13. Valores de la emulsión aniónica relacionados a la ecuación lineal de Langmuir y de la recta.....	105
Tabla 14. Valores de P adsorbido y la concentración en equilibrio	108
Tabla 15. Valores de pH de las isothermas del efecto dosis.....	108

SIMBOLOGÍA

P	Fósforo
$P_{\text{adsorbido}}$	Fósforo adsorbido
EA	Emulsión Aniónica
EC	Emulsión Catiónica
C	Control
g	gramos
μg	microgramo
Mg	Mega gramos
h_a	Hectáreas
mL	mililitros
cm	centímetros
cm^{-2}	centímetros cuadrados
C_{eq}	Concentración en el equilibrio
σ	Carga superficial
n	Concentración de los electrolitos de la doble capa difusa
K	Constante de Boltzman
T	Temperatura termodinámica
ϵ	Constante dieléctrica del medio
z	Carga del contra ión
pH_0	Parámetro característico del coloide
Å	Angstrom
eV	electro voltio
°C	grados centígrados
X_m	Adsorción máxima
K	Constante relacionada con la energía de enlace

INTRODUCCIÓN

La tercera parte del territorio venezolano está cubierto por sabanas, constituidas por diversos tipos que van desde las inundables hasta las arboladas bien drenadas. Las sabanas son ecosistemas herbáceos tropicales de un estrato más o menos continuo graminoíde con o sin formaciones leñosas dispersas con cierto grado de estacionalidad dependiendo de la oferta del agua y temperatura media anual.

Basado en las diferentes variaciones estacionales de la disponibilidad de agua en el suelo, las sabanas pueden separarse en tres tipos: estacional, hiperestacional y semiestacional. Los Llanos están caracterizados por dos períodos climáticos bien distintos, uno seco, llamado localmente verano, que comprende los meses de noviembre a abril, y uno húmedo o de lluvias, llamado invierno, que corresponde a los meses de mayo y octubre. En el período lluvioso ocurren aproximadamente un 90% de las precipitaciones promedio anuales, cercanas a los 1500 mm y la temperatura promedio anual se ubica alrededor de 27° C ^[2].

Los suelos de sabanas provienen de formaciones de diferentes edades geológicas, sometidas a intensos procesos de meteorización, causados por las abundantes lluvias y elevadas temperaturas, lo que ha contribuido a la formación de suelos con pH bajos (ácidos), de drenaje interno rápido con escasa capacidad de intercambio catiónico (el rango normal de Capacidad de Intercambio Catiónico (CEC) va desde < 3meq/100g, para suelos arenosos, bajos en materia orgánica y > 25meq/100g para suelos con alto contenido en ciertos tipos de arcilla y materia orgánica ^[3]). Todo esto ha inducido a una baja fertilidad y productividad en estos ecosistemas.

Estos suelos han sido impactados negativamente por las actividades económicas que se realizan o se han realizado en este vasto ecosistema tales como:

agricultura, ganadería, forestales, transporte y explotación petrolera. Las actividades petroleras: exploración y perforación, conducción y disposición de efluentes han sido los causantes del mayor deterioro de morichales, sabanas inundables y en general de humedales consideradas de mucha importancia por constituir reservas de agua dulce. La agricultura también ha sido causante del deterioro de los suelos ya que al quedar libre de su capa vegetal, es impactado negativamente por los eventos pluviales, arrastrando grandes cantidades de sedimentos al río Orinoco. La ganadería sin duda, ha sido la más antigua de las actividades en las sabanas venezolanas, y ha causado un impacto indirecto mediante la siembra de pastos artificiales, ya que se sustituye la cubierta herbácea nativa ^[4].

Es importante señalar, que la relativa abundancia de lluvia de estos suelos (1200 a 2000 mm) ha favorecido el lavado y con ello, la pérdida de elementos esenciales ^[5] (llamados así porque sin ellos las plantas no puede completar su ciclo biológico y adicionalmente no pueden ser sustituidos por ningún otro elemento). Estos elementos son requeridos en diferentes concentraciones, pudiéndose así distinguir dos tipos de elementos: los que se necesitan en mayor concentración y son llamados macroelementos o macronutrientes ^[6]; entre ellos se encuentran: Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio y Azufre, y los que se necesitan en menor concentración y son llamados microelementos o micronutrientes; tales como: Hierro, Zinc, Manganeso, Boro, Cobre, Molibdeno y Cloro ^[7].

Por ser el fósforo (P) un nutriente de gran importancia que permite el crecimiento de las plantas, el desarrollo de sus raíces y mejora el crecimiento de las mismas y su productividad ^[8], se ha identificado como el principal limitante de la producción primaria y secundaria de los ecosistemas de sabana ^[9]. Con la posible excepción del nitrógeno, ningún otro macronutriente es tan decisivo para el crecimiento de las plantas, como lo es el fósforo.

El fósforo se encuentra en los suelos de dos formas, una orgánica, ligada a la materia orgánica y una forma inorgánica, una parte de la cual es absorbida por las plantas y los organismos del suelo. La solubilidad de estas formas y por tanto su disponibilidad para las plantas está condicionada por reacciones fisicoquímicas y biológicas, que a su vez afectan la productividad de los suelos. Las transformaciones del fósforo (P) entre formas orgánicas e inorgánicas están estrechamente relacionadas, dado que el fósforo inorgánico (P_i) es una fuente para los microorganismos y las plantas, y el fósforo orgánico (P_o) al mineralizarse repone el fósforo en solución ^[10].

El conocimiento de las formas químicas específicas de los fosfatos es importante en el entendimiento de la química del P en los suelos, así como la génesis y fertilidad de los mismos. En suelos ácidos, el P forma compuestos insolubles con el hierro y el aluminio; mientras que bajo condiciones alcalinas, se forman compuestos de calcio. Estos compuestos dependen de las propiedades de los suelos, encontrándose que su solubilidad y estabilidad afectan la disponibilidad de P en los mismos ^[11].

Las plantas absorben únicamente el fósforo que está en la solución del suelo en forma de HPO_4^{-2} (ión fosfato monoácido) y $H_2PO_4^{-1}$ (ión fosfato diácido). Cualquier fertilizante de origen orgánico o mineral debe transformarse primero en esas especies químicas antes de ser utilizado por el cultivo. Las diferencias entre los residuos orgánicos y los fertilizantes minerales son principalmente dos: 1) velocidad de disponibilidad para el cultivo, pues los residuos orgánicos tienen que ser primero descompuestos por los microbios, mientras que los abonos minerales ya tienen los compuestos en la forma que la planta los utiliza; 2) concentración ya que los residuos orgánicos tiene concentraciones más bajas de fósforo que los compuestos minerales ^[12]

En la naturaleza, el fósforo forma parte de las rocas y los minerales del suelo.

Las fuentes de fósforo como nutrimento para las plantas son los fertilizantes minerales y los fertilizantes orgánicos. Los fertilizantes minerales son compuestos inorgánicos de fósforo que se extraen de los grandes yacimientos de “roca fosfórica”. Estos compuestos minerales, son tratados para hacerlos más solubles para que así, sean disponibles para las plantas y puedan ser utilizados por estas en la formación de tejidos y de órganos vegetales ^[12].

Como consecuencia de todo lo expuesto anteriormente, esta baja fertilidad natural en suelos ácidos de sabanas ha restringido el desarrollo de la agricultura en estos ecosistemas, ya que para obtener rendimientos apropiados (aún de cultivos poco exigentes), es necesaria la aplicación de dosis significativas de fertilizantes inorgánicos, que además de presentar altísimos costos, pueden degradar el ambiente de estos suelos. A lo largo de los últimos años se ha ensayado la aplicación de enmiendas orgánicas ^[9] y de emulsiones asfálticas (aceite/agua) que permiten un mejor desarrollo de los cultivos. En el caso del uso de emulsiones asfálticas sobre la superficie del suelo, después de la siembra, se ha demostrado en pruebas de laboratorio, invernadero y de campo, su efectividad para regular el régimen hídrico de los suelos, reduciendo en forma marcada los inconvenientes durante la estación de crecimiento, especialmente al inicio, cuando períodos alternados de excesos y déficit de agua afectan desfavorablemente a las plantas. Estas emulsiones estabilizan los agregados superficiales del suelo frente al impacto de las gotas de lluvia impidiendo el sellado y favoreciendo la infiltración y almacenamiento de agua en el suelo, lo que reduce las pérdidas de agua por evaporación en la superficie del suelo, contribuyendo a su conservación para fines del cultivo. Como beneficios colaterales, están la reducción de problemas de erosión en terrenos inclinados y la prevención de formación de costras que afecten la emergencia de las plántulas ^[13]. Además se destaca que el rendimiento del cultivo (expresado en 1,5 T/Ha) en un suelo Ultisol del Estado Anzoátegui y Ultisol,

Vertisol y Entisol del Estado Guárico tratado con asfalto duplica el rendimiento del cultivo del suelo sin tratar ^[14].

Dada la necesidad de brindar un aporte a la investigación de la agricultura sostenible, que involucre el manejo productivo de los recursos de la siembra y que satisfaga las necesidades humanas de Los Llanos, surge este Trabajo Especial de Grado, cuya idea es determinar el efecto de las emulsiones asfálticas y la roca fosfórica sobre la adsorción de P en suelos ácidos de sabanas de pedogénesis contrastantes.

CAPITULO I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y ANTECEDENTES

1.1 EL SUELO

El suelo es definido como un sistema de tres fases: sólido, líquido y gaseoso. Sus componentes varían en proporción, pero en condiciones ideales guardan una relación en base a volumen, de fase sólida 50 % y fase no sólida 50 % ^[11]. Esta proporción se encuentra distribuida de la siguiente forma: el 40-50% lo constituye la fracción mineral (arena, limo, arcilla, gravas), el 0-10% la materia orgánica (humus, residuos vegetales y animales), el 15-35% la fase gaseosa (O_2 , CO_2 , N_2) y el 15-35% la fase líquida (agua, iones, sales solubles, etc.) ^[15], (Figura 1).

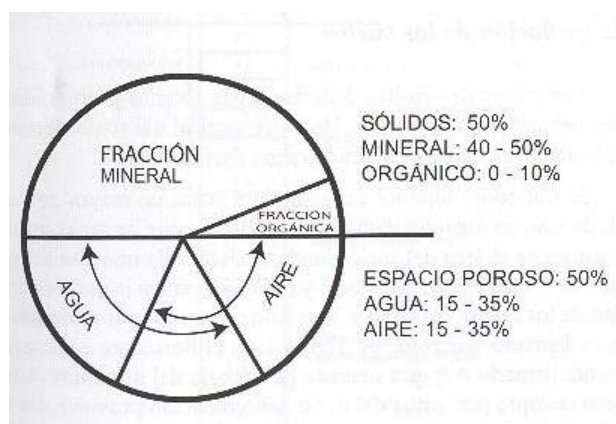


Figura 1. Componentes del suelo ^[16]

El límite superior del suelo es la superficie de contacto entre el suelo y la atmósfera, está constituido por el agua superficial, plantas vivas y material de plantas que no han empezado su proceso de descomposición. El límite inferior, lo constituye la superficie que se haya permanentemente cubierta por agua subterránea.

La fase sólida del suelo está compuesta por material orgánico e inorgánico. El material orgánico está compuesto por materia orgánica viva (organismos del suelo y raíces de plantas) y materia orgánica muerta. El material inorgánico, por su parte, está

distribuido en partículas de diferentes tamaños con propiedades físico-químicas variables, (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de sedimentos y rocas clásticas presente en la fracción inorgánica de los suelos ^[17]

Diámetro (mm)	Sedimento	Roca	Composición mineral ^[11]
256	Gravas	Conglomerado	Fragmentos de rocas, Cuarzo, Minerales primarios y secundarios.
64	Guijarros	Conglomerado	
4	Gránulos	Conglomerado	
2	Arenas muy gruesas	Arenisca	Minerales secundarios, formados por reacciones a bajas temperaturas, heredados de rocas Sedimentarias o formadas directamente por meteorización. Los minerales secundarios más comunes en los suelos, incluyen carbonatos, sulfatos, sulfuros, arcillas silicatadas y varios óxidos.
1	Arenas gruesas	Arenisca	
0,5	Arenas medias	Arenisca	
0,25	Arenas finas	Arenisca	
0,125	Arenas muy finas	Arenisca	
0,625	Limos	Limolita	Minerales primarios, formados a altas temperaturas y heredados de rocas ígneas y metamórficas. Los minerales primarios más abundantes son Cuarzo, Feldespato, Fragmentos de rocas y Minerales de arcillas.
0,0039	Arcillas	Lutita	

Desde un punto de vista edafológico, el suelo es un cuerpo natural con constituyentes minerales, orgánicos y organismos dividido en horizontes y presentan profundidad variable que se diferencia del material infra yacente en morfología, composición, propiedades físicas, propiedades químicas, características biológicas o

una combinación de las anteriores ^[18]. También, es el sitio donde viven y crecen las plantas y animales. Proviene de la desintegración de las rocas por la acción del clima y los microorganismos ^[16] y se forman por la interacción de factores abióticos (climáticos, composición mineral) y bióticos (acción de plantas y animales). Lo que pone de manifiesto que los suelos son sistemas químicos complejos formados por una mezcla de diferentes sustancias minerales y orgánicas, los cuales tratan principalmente de las interacciones entre la fase sólida y líquida.

Pedológicamente, el suelo es una CUBIERTA PEDOLÓGICA considerado como un objeto natural, continuo y tridimensional. Dichas cubiertas están formadas por constituyentes minerales y orgánicos, presentes en estado sólido, líquido o gaseoso. Estos constituyentes están organizados entre ellos, formando así "estructuras" específicas del medio pedológico. Las cubiertas pedológicas están en perpetua evolución, lo que les confiere una dimensión suplementaria: el tiempo ^[19].

La génesis del suelo o pedogénesis, comprende los cambios en los cuerpos de los suelos y trata de los factores y de los procesos de formación del suelo, es decir, de la evolución del suelo. Por el contrario, la destrucción del suelo es un proceso global denominado erosión o morfogénesis, implica un conjunto de procesos que ocurren muy rápidamente; ambos procesos, morfogénesis y pedogénesis, ocurren simultáneamente en el ambiente ^[15].

El suelo se forma en un largo proceso en el que interviene el clima, los seres vivos y la roca más superficial de la litosfera. Este proceso es una sucesión ecológica en la que va madurando el ecosistema suelo. La roca es meteorizada por los agentes meteorológicos (frío/calor, lluvia, oxidaciones, hidrataciones, etc.) y así la roca se va fragmentando. Los fragmentos de roca se entremezclan con restos orgánicos: hojas y fragmentos vegetales, organismos muertos o en descomposición, pequeños

organismos que viven en el suelo, etc. Con el paso del tiempo todos estos materiales se van estratificando y terminan por formar lo que llamamos suelo. Conforme va avanzando el proceso de formación y el suelo se hace más evolucionado, menos influencia tiene el material original que formaba la roca.

Los diferentes tipos de clases texturales de tamaños de partículas, aportan ciertas propiedades a los suelos. Ejemplo de ello son las arcillas, que gracias a la alta área superficial en sus partículas, incrementan la capacidad de los suelos para retener el agua y los nutrimentos esenciales. Las arcillas le otorgan a los suelos baja permeabilidad, lo que reduce en gran medida las pérdidas de nutrimentos por lavado, contrario a los suelos arenosos. Estos últimos, por su parte, sirven de soporte al sistema radical de las plantas y ayudan al suelo a ser más permeable y aireado [16].

1.1.1 Propiedades de los suelos

- **Textura**
- **Estructura de los suelos**

La textura de los suelos está relacionada con el tamaño de las partículas minerales. Los suelos arenosos carecen prácticamente de plasticidad y de tenacidad, su capacidad de imbibición es escasa y debido a los grandes espacios entre partículas separadas, el paso de agua filtrante es rápido, facilitando así el drenaje y aumentando el movimiento eficaz del aire; así, en general, los suelos en los cuales predomina la arena o la grava son de carácter abierto, con un buen drenaje y aireación y están normalmente en condición de fácil desmenuzamiento [6].

La estructura del suelo es la disposición de las partículas constituyentes del suelo (arena, limo y arcilla) en unidades más grandes ^[16]. A estas unidades se les ha denominado agregados estables al agua; ya que ofrecen resistencia a ser fracturados por el agua. Pueden presentar tamaños contrastantes de acuerdo al tipo de interacciones (físicas o fisicoquímicas) existentes entre las partículas del suelo donde intervienen también los microorganismos del suelo así como las raíces de las plantas. Se pueden distinguir macro y microagregados, con valores superiores e inferiores a 250 μm , respectivamente ^[20].

Para dar origen a los agregados existen mecanismos que explican la resistencia que mantiene juntas las partículas del suelo de manera que la forma persista en el tiempo. La fracción coloidal del suelo dentro de la cual se pueden distinguir minerales de arcilla (óxidos de hierro y aluminio) y coloides orgánicos (materia orgánica) son uno de los constituyentes que actúan como agentes cementantes, la molécula del agua constituye un factor importante en la formación de estos agregados. El agua por ser una molécula dipolar, se une a las partículas del suelo, que forma un coloide con carga negativa. Las moléculas de agua se mantienen unidas fuertemente y en la medida que el suelo se va secando, la distancia entre las partículas se hace más corta y tienden a estar juntas formando los agregados. Los espacios porosos que se forman entre los agregados permiten que sea retenida agua en el interior del mismo y que el aire pueda circular, ambiente que es favorable para el crecimiento de las plantas. Las características del suelo son influenciadas por su estructura. La fracción coloidal, conjuntamente con el agua, constituyen las fuerzas que inducen la agregación en los suelos ácidos ^[16].

1.1.2 Coloides de los suelos

Un coloide es una dispersión de pequeñas partículas de un material en otro. Los

sistemas dispersos están compuestos de dos o más fases, generalmente están conformados por dos fases: una dispersa constituida por un conjunto de partículas finas (que no alcanzan la subdivisión molecular) y la otra la constituye el medio que las envuelve (medio de dispersión). Las dos fases de un sistema coloidal pueden ser sólidas, líquidas o gaseosas, todas las combinaciones son posibles desde el punto de vista coloidal, excepto la de un gas disperso en otro gas ^[21].

Una fracción importante de los componentes sólidos del suelo, la fracción arcilla, tiene un tamaño de grano inferior a 2 micras ($2\ \mu\text{m} = 2 \times 10^{-6}\ \text{m}$). Los coloides están formados por partículas cuyas dimensiones son de aproximadamente 1 y $0.001\ \mu\text{m}$ (Figura 2) y es en este rango de tamaños donde los procesos de superficie adquieren toda su importancia ^[22].

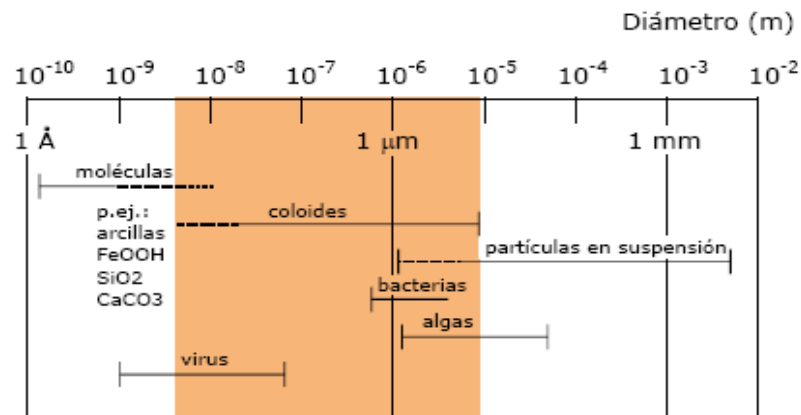


Figura 2. Rango de tamaños de las partículas coloidales y comparación con los tamaños de otros elementos presentes en los suelos ^[23]

La mezcla coloidal se comporta de manera particular debido a la gran área superficial de interacción que se origina entre las dos fases. La reactividad de los suelos se encuentra determinada por el área superficial que es el resultado directo de las dimensiones, formadas de las partículas y de la carga de la superficie. Los minerales arcillosos presentan un tamaño reducido tanto de partículas como de carga superficial,

lo cual le otorga propiedades fisicoquímicas particulares; sus pequeñas dimensiones hacen que se comporten como un sistema coloidal cuando entra en contacto con el agua, mientras que la presencia de cargas le permite atraer sustancias ubicadas en la solución que esta en contacto con ellas ^[24].

En el suelo, las micelas coloidales son partículas sólidas en dispersión que se encuentran cargadas eléctricamente (tales como partículas de minerales arcillosos, de materia orgánica o de óxidos e hidróxidos de Fe y Al) y que ejercen atracción sobre los iones de carga contraria presentes en el medio de dispersión (agua del suelo).

En la Figura 3 se muestra esquemáticamente la distribución de las cargas negativas en la superficie de un mineral arcilloso. Estas cargas se originan en forma generalizada a partir de dos situaciones: en bordes de cristales, superficies externas e imperfecciones de la red cristalina y a través de sustituciones isomórficas de la estructura cristalina.

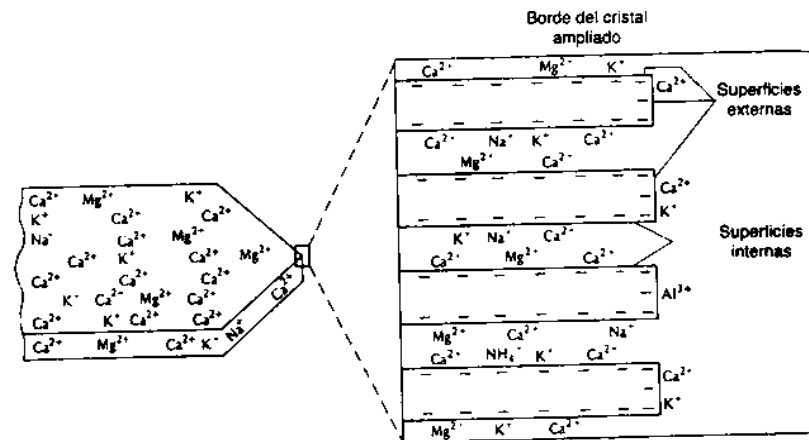
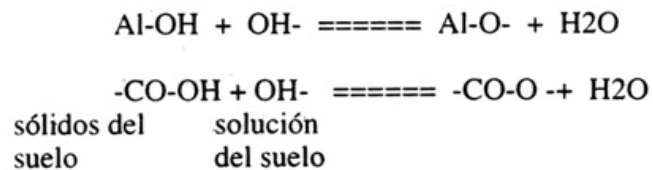


Figura 3. Distribución esquemática de las cargas negativas en la superficie de un mineral arcilloso y de los cationes compensantes ^[8]

Las cargas presentes en las arcillas como resultado de las sustituciones isomórficas (sustitución de cationes de determinada valencia por otros de valencia

menor pero de similar radio iónico) son de carácter permanente, y no dependen del pH de los suelos.

Los minerales que generan cargas negativas en sus bordes por disociación del ión OH^- se denominan minerales de carga variable ^[16]. La carga negativa variable, varía con el pH, siendo generalmente alta a valores altos de pH. Está controlada por las concentraciones relativas de los iones H^+ y OH^- y su efecto sobre los grupos OH^- expuestos en los coloides del suelo. En condición de pH alto, los iones OH^- de la solución del suelo provocan la disociación del ión H^+ del grupo oxidrilo del coloide. Esto puede esquematizarse para los materiales inorgánicos (Al-OH) y orgánicos ($-\text{COOH}$) de la manera siguiente ^[21]:



Al aumentar el pH del suelo, más iones OH^- se tornan disponibles para desplazar las reacciones hacia la derecha con lo que la carga negativa de las partículas aumenta. Si el pH del suelo disminuye, se reduce la presencia de iones OH^- , las reacciones se desplazan hacia la izquierda y la negatividad eléctrica se reduce.

Las cargas negativas de los suelos se encuentran suplementadas por cargas variables, que surgen primariamente de la disociación de iones H^+ de los grupos OH^- de algunos minerales arcillosos de tipo 1:1 (ejemplo la Caolinita), de la materia orgánica, de los óxidos de hierro y aluminio y de algunos materiales minerales amorfos. Para el caso de la materia orgánica, se observó que los grupos carboxilos ($\text{pK}_a = 3$ a 5) se ionizan progresivamente y aumentan la carga negativa a medida que el pH se eleva desde valores muy bajos ^[25]. Los grupos fenólicos ($\text{pK}_a = 9$ a 10) se ionizan en forma

similar y hasta pH por encima de 7. La disociación del ión hidrógeno desde grupos hidroxilos de los carbohidratos tiene muy elevado pKa (> 13) y en la práctica no contribuyen a las cargas dependientes del pH a valores de pH menores que 11.

En la Figura 4, se muestra cómo la carga eléctrica superficial creada en la superficie de los coloides debe ser compensada por iones de carga opuesta, que se acumulan en la cercanía de la superficie. Si la superficie está cargada negativamente, atrae cationes hacia ella. Atraerá aniones si su superficie está cargada positivamente. Las fuerzas de dispersión tratarán de contrarrestar este aumento de concentración de iones en la superficie y los tratará de regresar al seno de la solución, procurando disminuir su concentración en la cercanía del coloide. De esta forma se crea una nube de iones alrededor del coloide, llamada capa difusa. Si el coloide está cargado negativamente, la capa difusa estará formada por cationes. Los aniones serán repelidos de la superficie de la coloide y su concentración aumentará a medida que se aleje de la superficie hacia el seno de la solución. A la superficie del coloide y a la capa difusa se le conoce con el nombre de la **Doble Capa Difusa**.

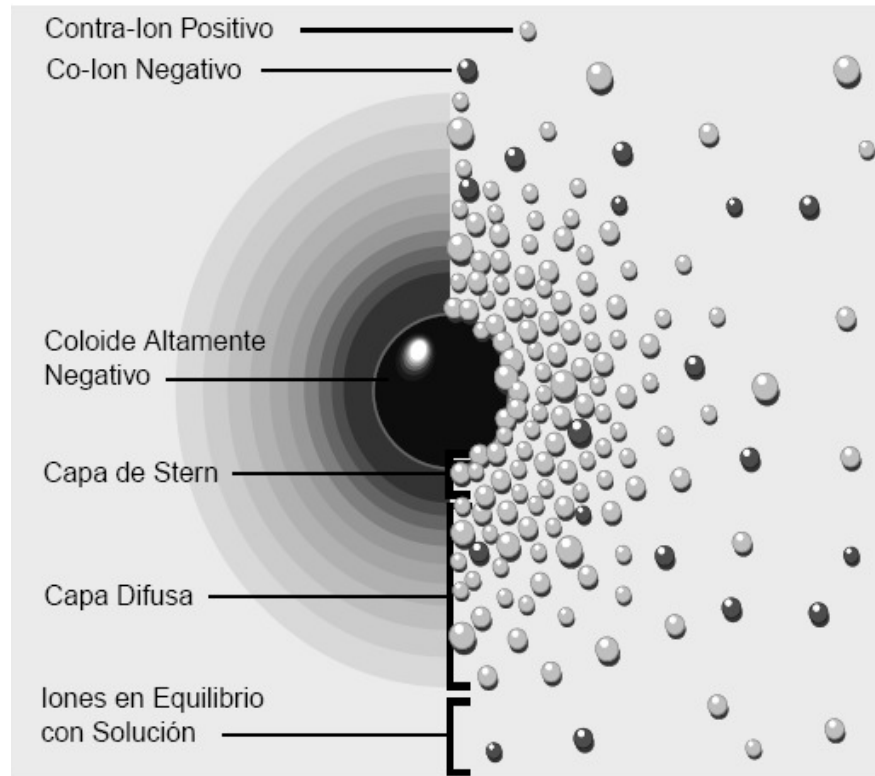


Figura 4. Modelo de la doble capa difusa. La vista izquierda muestra el cambio en la densidad de carga alrededor del colóide. La derecha muestra la distribución de iones positivos y negativos alrededor del colóide ^[26]

La densidad de carga superficial σ puede ser descrita por la ecuación Modelo de Gouy Chapman:

$$\sigma_v = \left[\frac{2n\epsilon KT}{\pi} \right]^{1/2} \sinh(1,15Z(\text{pH}_0 - \text{pH})) \quad (1)$$

Donde σ es la densidad de carga superficial (esu cm^{-2}), n representa la concentración de electrolitos de la doble capa difusa, K es la constante de Boltzman ($1.38 \cdot 10^{-16} \text{erg.K}^{-1}$), la temperatura termodinámica viene expresada por la variable $T(\text{K})$, ϵ es la constante dieléctrica del medio ($80 \text{esu}^2 \text{dina}^{-1} \text{cm}^{-1}$), z la carga del contra ión y pH_0 es el parámetro característico del colóide.

Esta ecuación muestra que en algún punto de la escala de pH, la densidad de carga puede ser cero. El pH donde sucede esta condición se denomina pH_0 y es un parámetro característico del coloide, ya que determina el signo de la carga del mismo. Si el pH del medio es mayor que el pH_0 , el coloide estará cargado negativamente, será intercambiador de cationes. Si el pH es menor, es más ácido que el pH_0 , el coloide será intercambiador de aniones. Cuando el pH del medio coincide con el pH_0 , el coloide estará sin carga, estará en su máxima estabilidad química, y es el punto donde los coloides se dispersan fácilmente ^[27]. La Tabla 2 presenta los valores de pH_0 de algunos coloides de carga variable.

Tabla 2. Valores de pH_0 para algunos minerales presentes en el suelo ^[27]

Sólido	pH_0
Goethita	8,8
Hematita	8,5
Magnetita	6,9
Óxido de Fe (amorfo)	8,0
Gibbsita	9,8
Óxido de Al (amorfo)	9,3
Caolinita	2,9
SiO ₂	2,5
Materia Orgánica	3,0

Especies como la sílice, la caolinita y la materia orgánica incrementan la capacidad de intercambio de cationes en el suelo (CIC) ya que tienen pH_0 en el rango ácido. El signo entre ($pH_0 - pH$) define el signo de la carga eléctrica superficial del coloide. Entre mayor sea la diferencia entre pH_0 y pH, mayor es la CIC del coloide ^[27].

Generalmente, los suelos tienen la mineralogía del coloide mixta, es decir, tienen coloides de carga variable y de carga permanente. En estos casos, la CIC del suelo será la suma de la CIC del coloide de carga variable (CICv) y la CIC del coloide de carga permanente (CICp). Como la densidad de carga representa la CIC se tiene que:

$$\sigma_t = \sigma_v + \sigma_p \quad (2)$$

donde σ representa la densidad de carga total, variable y permanente.

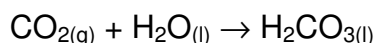
Cuando la densidad de carga del coloide de carga variable se hace igual a la densidad de carga del coloide de carga permanente, el suelo tendrá la densidad de carga total igual a cero. El pH en el cual sucede esta situación se denomina **punto de carga neta cero (PCNC)** y es característico de suelos con una mezcla de cargas variables y permanentes ^[27].

La carga neta que un suelo tenga es de gran importancia en el manejo que se le pueda dar al mismo, dado que la mayoría de las reacciones que controlan la aprovechabilidad de los nutrientes, y algunas de las propiedades físicas, dependen de los procesos fisicoquímicos que ocurren en las arcillas, es por ello que el control de pH en el suelo es crucial en el manejo apropiado ^[16]. En el caso de los suelos ácidos de sabana, es necesario aumentar el pH para así poder obtener mejoras en cuanto a sus propiedades.

El estudio de los coloides es de vital importancia debido al rol que desempeñan en el suelo. Ejercen un papel fundamental en la nutrición vegetal debido a su capacidad de adsorber y fijar iones, juegan un rol importante en la dinámica del agua y actúan en la formación de la estructura del suelo. Por lo tanto, determinan otras propiedades tales como la aireación, el drenaje, penetración radicular, etc.

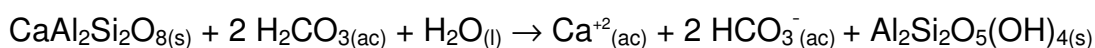
1.1.3 Formación de las arcillas en los suelos

Una cuestión importante en la formación del suelo es la génesis de los minerales más característicos: las arcillas. En concreto, la formación de los minerales de la arcilla en este ambiente está íntimamente ligada a reacciones de hidrólisis de los minerales silicatados de las rocas. Estas reacciones pueden desarrollarse en el medio hidrotermal (durante la formación de un depósito mineral), o como procesos exógenos (bajo condiciones atmosféricas), una vez que las rocas por erosión se encuentran en la superficie o su proximidad. El CO_2 disuelto en el agua de lluvia puede desencadenar una serie de procesos hidrolíticos ^[28]:

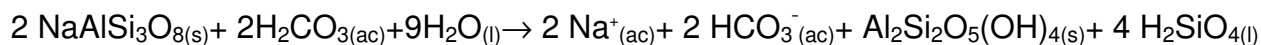


El ácido carbónico así formado reacciona con los feldespatos, induciendo la formación de minerales del grupo de la arcilla. A continuación se ilustra este tipo de reacciones con tres ejemplos conducentes a la formación de caolinita, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ^[28]:

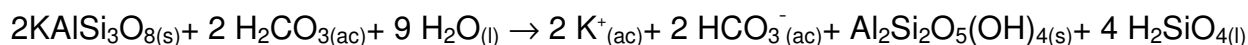
1) Hidrólisis de anortita (plagioclase cálcica):



2) Hidrólisis de la albita (plagioclase sódica):



2) Hidrólisis de la ortoclase (feldespato potásico):



El clima, a través de los parámetros de humedad y temperatura, controla fuertemente el proceso formador de arcillas a partir de los silicatos. Así, en condiciones de humedad y calor la hidrólisis dará lugar a arcillas caoliníticas, e incluso a un residuo final de gibbsita, $\text{Al}(\text{OH})_3$. Por el contrario, en climas áridos la arcilla predominante resulta ser del tipo illita-esmectita. Cabe destacar, no obstante, que el mundo de los procesos formadores de arcillas es extraordinariamente complejo, por lo cual lo anteriormente dicho tiene que ser tomado únicamente en el contexto de una simplificación didáctica ^[28].

Existen tres modelos para la génesis de las arcillas:

- a) **Herencia:** las arcillas del suelo se formaron en una etapa anterior del ciclo petrológico, bajo condiciones diferentes a las actuales. Se las llama heredadas porque no se corresponden con las condiciones de equilibrio termodinámico actualmente existentes.
- b) **Neoformación:** mecanismo fundamental de creación de arcillas, debido a que este proceso crea íntegramente la estructura del mineral. Mediante la neoformación las arcillas se forman por cristalización directa de una solución o por evolución a partir de compuestos sólidos no cristalinos.
- c) **Transformación:** mecanismo que opera sobre un filosilicato preexistente para transformarlo en una arcilla. El filosilicato puede ser otra arcilla o una mica. Este mecanismo implica una sustracción, adición o sustitución de elementos químicos.

En resumen:

Herencia = Preservación

Neoformación + Transformación = Génesis

Se considera que las arcillas pueden formarse en tres ambientes mayores

- a) Ambiente de meteorización: incluye la génesis de arcillas por procesos físico-químicos, catalizados o no por agentes biológicos. Este es el caso específico de la neoformación y transformación de minerales arcillosos en los mantos de alteración (regolito + suelo).
- b) Ambiente sedimentario: se define como subacuático y generalmente marino.
- c) Ambiente diagenético – hidrotermal: implica condiciones de soterramiento, aumento de presión y temperatura, así como la eventual participación de fluidos supercríticos.

1.1.4 Suelos ácidos de sabanas

La acidez de los suelos puede ser definida como la “capacidad del sistema suelo para ceder H^+ desde un estado dado a un estado de referencia”^[11]. Los suelos ácidos son comunes en todos los lugares en donde las precipitaciones sean abundantes, produciéndose así un lavado continuo y una gran pérdida de nutrientes, razón por la cual los suelos venezolanos presentan una escasez de elementos nutrientes importantes, entre los cuales es encontrado el fósforo^[6].

Entre los factores que intervienen en la acidez de los suelos, podemos encontrar: i) la remoción de las bases debido a la absorción de las plantas y/o por el lavado de los suelos, ii) la actividad de las raíces y de los microorganismos presentes (basándose en la reacción $CO_2 + H_2O = H_2CO_3$), iii) la aplicación de fertilizantes que contengan nitrógeno (N) y azufre (S) entre sus componentes y iv) los procesos de oxidación^[11].

Gran parte de nuestro territorio está conformado por ecosistemas de sabanas. Estos ecosistemas son consecuencia directa de los procesos de meteorización y se

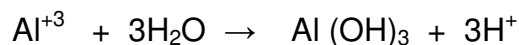
caracterizan en su mayoría por tener drenaje interno rápido y suelos pobres en nutrientes.

Las elevadas temperaturas de las zonas y las abundantes lluvias promueven un acelerado lavado de cationes básicos del suelo (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+} y K^{+} , principalmente), a lo que se asocia la baja fertilidad natural de estos suelos que afecta directamente el crecimiento de las plantas. Al lavarse los suelos y perderse las bases intercambiables, permanecen cationes de hierro (Fe) y aluminio (Al) formando silicoaluminatos y silicoferratos cuya hidrólisis produce ácidos silícicos que por intercambio catiónico transfieren protones al medio dando carácter ácido a los suelos de estos ecosistemas ^[29].

En condiciones ácidas el aluminio se encuentra soluble y se presenta como Al^{+3} , éste es fuertemente adsorbido por los coloides del suelo formándose un equilibrio entre el Al que hay en la solución del suelo ^[29]:



Los iones de Al^{+3} en la solución del suelo se hidrolizan y transfieren más protones al medio ^[29]:



El efecto negativo de la acidez de estos suelos sobre el crecimiento de las plantas no esta solo en el contenido de protones del medio. El efecto radica en el exceso de aluminio, hierro, manganeso soluble y otros iones metálicos que forman complejos con algunos elementos como calcio, fósforo y molibdeno en la superficie del coloide quedando fuertemente retenidos provocando su escasez en la solución del suelo ^[29].

1.1.5 Papel de la materia orgánica en la fertilidad de los suelos

La materia orgánica de los suelos desempeña un papel muy importante en la formación de los agregados del suelo, en el control de la acidez, en el reciclado de nutrientes y en la depuración de sustancias tóxicas. Está formada por biomoléculas (como ácidos orgánicos, aminoácidos o polisacáridos) y por sustancias húmicas (polímeros orgánicos de elevado peso molecular formados por acción bacteriana) ^[22].

La materia orgánica es aquella que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, tejidos y células de organismos que viven en el suelo y sustancias producidas por los habitantes del suelo ^[30]. Se encuentra constituida por: la fracción gruesa (residuos de plantas y animales), el humus (residuos resistentes a la degradación más productos sintetizados por los microorganismos) y la biomasa activa (organismos del suelo más raíces de plantas). El origen de los compuestos húmicos se debe a la presencia de polifenoles derivados de la lignina o sintetizados por los microorganismos que se convierten mediante la acción de enzimas en quinonas, que después se polimerizan para formar los polímeros que constituyen el humus.

La fracción orgánica del suelo regula los procesos químicos, influye sobre las características físicas y es el centro de casi todas las actividades biológicas en el mismo. Los efectos que puede generar la materia orgánica sobre estas propiedades, se presentan a continuación ^[11]:

- 1) Procesos químicos en los que la materia orgánica interviene:
 - El suministro de elementos por medio de la mineralización, en particular la liberación de N, P, S y micronutrientes disponibles para las plantas.
 - La estabilidad de la acidez del suelo por su poder amortiguador.

- La apreciable contribución a la capacidad de cambio catiónico de los suelos, muy valiosa para los de textura arenosa.
 - La volatilización de S y N de los suelos, sobre todo procedentes de la materia orgánica que se descompone fácilmente.
 - Los fenómenos de adsorción, entre los que son de particular importancia la inactivación de plaguicidas y la fijación del fósforo.
- 2) Propiedades físicas que la materia orgánica afecta:
- Favorece la formación de agregados individuales, reduce la agregación global del suelo y disminuye la plasticidad del mismo.
 - Uso más eficiente del agua, lo que debe a una serie de fenómenos promovidos por la presencia de la materia orgánica, sobretudo en suelos de textura gruesa.
- 3) Propiedades biológicas en las que la materia orgánica es fuente:
- De nutrimentos tanto para los organismos superiores como para los inferiores, por sus compuestos de carbono.

La materia orgánica se puede esquematizar de la siguiente manera:



Figura 5. Esquema de la materia orgánica en el suelo ^[11]

Con el fin de comprender un poco mejor las estructuras de la materia orgánica, se definirán a continuación las sustancias húmicas, los ácidos húmicos y fúlvicos, así como también las huminas y el proceso de formación del Humus ^[31].

Sustancias Húmicas: Constituyen grupos heterogéneos que no están definidos por una composición determinada sino que establecen sus formas en base a su comportamiento frente a determinados reactivos. El Humus, al tratarlo con una serie de reactivos extractantes, se separa en fracciones. A cada fracción se le brinda un nombre según la estructura que contenga.

Mediante reactivos alcalinos como el NaOH, se separan las huminas (que son insolubles) de los ácidos fúlvicos y húmicos (que son solubles). Estos últimos se separan mediante tratamiento ácido, generalmente HCl ó H₂SO₄. Los ácidos fúlvicos son solubles tanto en medio alcalino como en medio ácido, mientras que los húmicos son solubles en medio alcalino e insoluble en medio ácido. Este comportamiento permite hacer separaciones ácido-base, de corte sencillo y rápido.

Entre las características comunes de las sustancias Húmicas se destacan:

- Sustancias amorfas de colores oscuros.
- Polímeros tridimensionales de elevado peso molecular.
- De carácter ácido, constituido por grupos funcionales variables:
 - Núcleo: grupos aromáticos nitrogenados (ejemplo: pirrol); grupos bencénicos aromáticos (ejemplo: naftaleno)
 - Grupos reactivos: responsables de importantes propiedades de la materia orgánica, ejemplo: hidroxilos, carbonilos, aminos, etc.
 - Puentes de Unión: nitrilos, aminos, cetónicos y cadenas alifáticas.

Ácidos Húmicos: Se presentan como sólidos amorfos de color marrón oscuro, generalmente insolubles en agua y en casi todos los disolventes no polares, pero fácilmente dispersables en hidróxidos y sales básicas de los metales alcalinos, constituyendo un hidrosol que puede experimentar floculación mediante tratamiento de ácidos y demás cationes. Su molécula parece estar constituida por un núcleo de naturaleza aromática con mayor predominio de radicales alifáticos, presentando en conjunto el carácter de heteropolímero condensado.

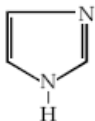
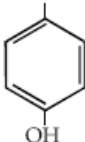
Ácidos Fúlvicos: Constituyen una serie de compuestos sólidos y semisólidos, amorfos, de color amarillento y naturaleza coloidal, fácilmente dispersables en agua y no precipitados por ácidos, susceptibles en cambio, a experimentar floculación en determinadas condiciones de pH y concentraciones de soluciones de cationes no alcalinos.

Huminas: Constituyen un grupo de sustancias relativamente diferentes entre sí, cuyo origen se estima que provenga de herencia. Estas últimas son comparables con los ácidos húmicos y fúlvicos, pero están muy ligadas a la fracción mineral por medio de enlaces que solo pueden ser destruidos en el laboratorio por medio de agentes químicos (que rompen la unión con silicatos, por ejemplo). Al final del tratamiento se obtiene un residuo que se denomina humina, residuo no extraíble.

Humificación: Es el proceso de formación del humus, es decir, conjunto de procesos responsables de la transformación de la materia orgánica. Esta transformación puede llegar a la destrucción total de los compuestos orgánicos dando lugar a productos inorgánicos sencillos (producto de mineralización: CO_2 , NH_3 , H_2O , etc.)

Dado que el humus presenta una organización coloidal similar a la de la arcilla. Un "anión" (micela) fuertemente cargado se encuentra rodeado por una "nube" de cationes adsorbidos. Las reacciones de estos cationes son similares, ya estén adsorbidos por la arcilla o por el humus del suelo. Las sustancias húmicas tienen una superficie específica y una densidad de adsorción grandes, lo que las hace muy reactivas en contacto con la solución edáfica, participando en gran cantidad de reacciones de intercambio catiónico. En la Tabla 4, se presentan por orden de abundancia promedio, los grupos funcionales superficiales más importantes de las sustancias húmicas. Esto incluye tanto a los ácidos húmicos como a los fúlvicos, que se diferencian sobre todo en el peso molecular ^[32].

Tabla 3. Grupos funcionales superficiales más importantes de las sustancias húmicas^[32]

Grupo funcional	Fórmula estructural	Símbolo
Carboxilo	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C}-\text{OH} \end{array}$	$\equiv\text{S}-\text{COOH}$
Carbonilo	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C}- \end{array}$	$\equiv\text{S}-\text{CO}^+$
Amino	$-\text{NH}_2$	$\equiv\text{S}-\text{NH}_2$
Imidazol		$\equiv\text{S}-\text{Imidazol}-\text{NH}$
OH fenólico		$\equiv\text{S}-\text{Fenol}-\text{OH}$
OH alcohólico	$-\text{OH}$	$\equiv\text{S}-\text{OH}$
Sulfhidrilo	$-\text{SH}$	$\equiv\text{S}-\text{SH}$

La carga negativa de los coloides orgánicos es esencialmente dependiente del pH. Bajo condiciones fuertemente ácidas, el hidrógeno se encuentra enérgicamente

unido a los grupos funcionales mencionados en la tabla 3 y no es fácilmente reemplazable por otros cationes. El coloide por lo tanto exhibe una baja carga negativa y la capacidad de adsorción de cationes es también baja. Ante un aumento de pH, primero el hidrógeno de los grupos carboxilo y luego el de los grupos enólicos y fenólicos se ioniza y es reemplazado por calcio, magnesio y otros cationes. Bajo condiciones alcalinas. La capacidad de adsorción de cationes por el humus, excede ampliamente a la mayoría de los filosilicatos arcillosos^[21].

Los componentes elementales de los ácidos húmicos y fúlvicos, se estudian generalmente, por ser grupos muy activos en cuanto a su estructura química a pesar de ser diferentes entre sí. Por otra parte, las huminas no son muy reactivas debido a la predominancia de la estructura aromática formada por C y H, principalmente. En general, los ácidos fúlvicos tienen mayor contenido de oxígeno, acidez total y grupos funcionales que los ácidos húmicos y éstos a su vez, tienen mayor contenido de carbono y nitrógeno que los ácidos fúlvicos. El contenido de acidez total y grupos funcionales origina mayor actividad. En consecuencia, los ácidos fúlvicos son de mayor actividad que los ácidos húmicos. Para distinguir entre ácidos húmicos y fúlvicos se toma en cuenta el peso molecular, cantidad de grupos funcionales, radicales y acidez^[11].

La importancia de la materia orgánica ha sido expuesta anteriormente, así como también el hecho de que ella deba ser mineralizada primeramente para generar iones inorgánicos como por ejemplo H_2PO_4^- , (forma de P que la planta adsorbe), los cuales se encuentran en el suelo tanto en equilibrio con ciertas especies (según el pH del medio) como reaccionando químicamente.

1.2 EL FÓSFORO

1.2.1 Propiedades Químicas

Símbolo del fósforo (P), número atómico 15, peso atómico 30.97. El fósforo es un elemento no metálico de química esencialmente covalente. No se encuentra libre en la naturaleza pero se presenta en forma de fosfatos principalmente en los minerales de apatito presente en las rocas ígnea. Es la base de un 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. Los ácidos nucleicos, que entre otras cosas forman el material hereditario (los cromosomas), contienen fosfatos, así como cierto número de coenzimas. Los esqueletos de los animales están formados por fosfato de calcio. En la Tabla 4, se pueden observar los datos químicos del fósforo.

Tabla 4. Datos químicos del Fósforo ^[33]

Nombre	Fósforo
Número atómico	15
Valencia	+3,-3,5,4
Estado de oxidación	+5
Electronegatividad	2,1
Radio covalente (Å)	1,06
Radio iónico (Å)	0,34
Radio atómico (Å)	1,28
Configuración electrónica	[Ne]3s ² 3p ³
Primer potencial de ionización (eV)	11,00
Masa atómica (g/mol)	30,9738
Densidad (g/ml)	1,82
Punto de ebullición (°C)	280
Punto de fusión (°C)	44,2
Descubridor	Hennig Brandt en 1669

1.2.2 Importancia del Fósforo en las plantas

El P, luego del nitrógeno, es el macro nutriente que en mayor medida limita el rendimiento de los cultivos. Interviene en numerosos procesos bioquímicos a nivel celular y se le considera un nutriente esencial para las plantas ^[34].

Es un macro nutriente porque las plantas lo requieren consigo para su desarrollo y crecimiento. Es suministrado por los minerales que se encuentran presentes en el suelo y por la descomposición de la materia orgánica, lo cual permite que se libere compuestos orgánicos de P que sólo después de ser mineralizados pueden ser asimilados por las plantas y artificialmente con la ayuda de los fertilizantes de donde la mayor parte de P es fijada en los mismos suelos en lugar de ser aprovechado por las plantas ^[29]. El fósforo es importante ya que contribuye entre otras cosas con el crecimiento de las plantas, interviene en la división celular, en la formación de semillas, en la maduración de las cosechas y en el desarrollo de las raíces. En los suelos ácidos de sabana está presente en cantidades muy bajas por lo que su disponibilidad restringe el crecimiento de las plantas ^[29].

1.2.3 Formas del fósforo en el suelo

El P en el suelo se encuentra de dos formas: una orgánica y otra inorgánica. Dependiendo del tipo de suelo, se puede decir que entre 60-50% corresponde a la fracción orgánica, mientras que el resto se encuentra en forma inorgánica ^[31]. Las formas inorgánicas de fósforo, provienen de los minerales del suelo. Dentro de los compuestos orgánicos de P que han sido identificados con mayor exactitud están el inotisol fosfato, los fosfolípidos y los ácidos nucleicos. Las formas orgánicas del P no son directamente absorbidas por las plantas por lo que deben ser mineralizadas por la actividad microbiana para generar iones HPO_4^{-2} a la solución de los suelos.

- **Formas inorgánicas de fósforo**

El fósforo inorgánico posee menor solubilidad que los compuestos fosfatados orgánicos y su abundancia es de acuerdo al origen del suelo donde provienen, a los niveles de materia orgánica y al pH. En principio se establecen tres grandes subdivisiones para esta categoría o tipo de fosfato, las cuales son:

- ✓ Formas discretas de fosfatos precipitados sobre superficies, las cuales son más fácilmente aprovechables.
- ✓ Partículas discretas de fosfatos ligeramente aprovechables.
- ✓ Fosfatos ocluidos, los cuales no son muy aprovechables y consisten en fosfatos ocluidos en carbonatos y óxidos.

Estos fosfatos interactúan en un sistema dinámico-heterogéneo que envuelve las raíces de las plantas, la solución y la fase sólida del suelo. Bajo, condiciones de crecimiento vegetal activo, la tendencia de los iones fosfatos es a difundir hacia las raíces de las plantas y ser absorbidos por ellas; una vez que la solución del suelo es agotada en fosfatos, desde la fase sólida es liberada cierta proporción del fosfato superficial a través de un proceso de desorción, en el cual intervienen aniones orgánicos e inorgánicos comúnmente asociados al ambiente de raíces; de la misma manera, la descomposición (mineralización) de la materia orgánica enriquece en fosfatos la solución del suelo. Si el nivel de fosfatos en solución se incrementa por ejemplo, mediante adición de fertilizantes solubles en agua, la adsorción de estos fosfatos sobre la superficie del suelo o su precipitación como compuestos relativamente insolubles serán los procesos que dominarán los equilibrios de fosfatos, (Figura 6).

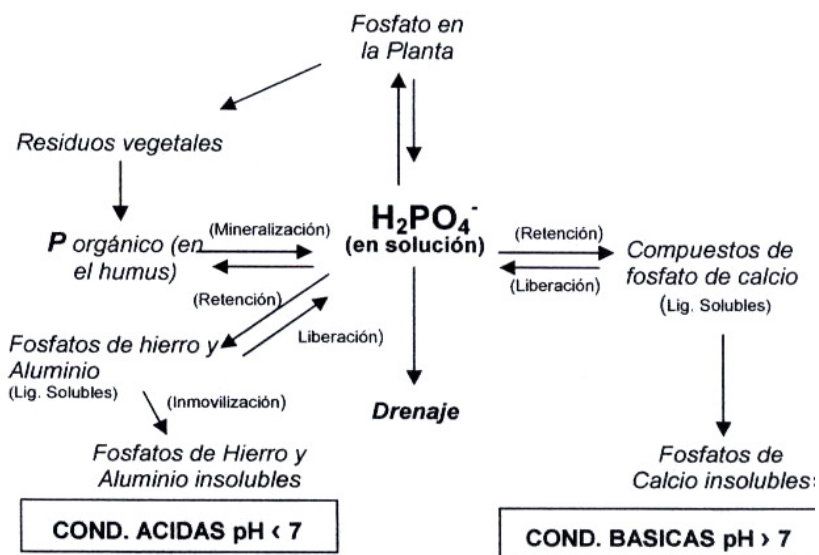


Figura 6. Reacciones en las que intervienen los fosfatos en el sistema suelo-planta ^[35]

La Figura 6 muestra que, de acuerdo con el pH, la retención de fosfatos ocurre con formación de diferentes compuestos. En condiciones ácidas, los productos finales son compuestos insolubles de hierro y aluminio, mientras que en suelos calcáreos los compuestos insolubles de fosfatos de calcio ocurren con mayor probabilidad ^[34].

Es importante señalar, que el fósforo es adsorbido por la raíz de las plantas en forma de ión ortofosfato primario (H_2PO_4^-), o como ortofosfato secundario (HPO_4^{2-}). En el caso de estos aniones, el pH influye enormemente en la proporción con la que son adsorbidos por la planta. Así, Cuando se tienen valores de pH básicos o alcalinos en el suelo, se puede reducir la disponibilidad del (H_2PO_4^-) porque puede haber precipitación de sales de fósforo al reaccionar con cationes como el Calcio (Ca^{+2}) o Magnesio (Mg^{+2}) y formarse fosfatos poco solubles con estos elementos. Por el contrario, cuando existen valores de pH ácidos en el suelo, se podrán formar otros compuestos fijando (HPO_4^{2-})

con cationes como el hierro (Fe^{+2}), aluminio (Al^{+3}) y manganeso (Mn^{+2}), los cuales aumentan su solubilidad a medida que disminuye el pH (pH mas ácido) ^[36].

La solubilidad de numerosos compuestos que contienen P en el suelo está determinada principalmente por el pH. Los fosfatos de hierro, manganeso y aluminio son poco solubles en agua (con pH neutro). Así, ellos predominan en suelos ácidos. Por el contrario, a un nivel de pH superior a 7.0, se producen compuestos insolubles de fósforo con calcio (Ca) y magnesio (Mg) y sodio (Na). Entonces, las formas más solubles y disponibles de P, en general, se presentan dentro de rangos de pH entre 5,5 y 7,0 ^[36].

- **Formas orgánicas de fósforo**

Los fosfatos orgánicos representan una proporción variable del fósforo total, el cual va desde el 2,6 % al 75 %, pudiendo alcanzar hasta un 80 %. Los compuestos de fosfato orgánico más comúnmente encontrados en los suelos, son los fosfatos de inositol, los ácidos nucleicos y los fosfolípidos. La sal de myo-inositol hexafosfato (ácido fítico) es uno de los constituyentes más comunes de la materia orgánica proveniente de las plantas. El ácido fítico es una sustancia muy estable y es relativamente soluble en agua. La insolubilidad de esta sal, cuando forma compuesto con el hierro, se usa para distinguir el hexafosfato de inositol (IHP) de otros esteres-fosfatos y orto fosfatos y es la base de muchas estimaciones en extractos de plantas. Este ester es sumamente estable cuando se le añaden bases fuertes, pero es gradualmente hidrolizado en soluciones ácidas ^[37]. Su estructura se muestra en la Figura 7.

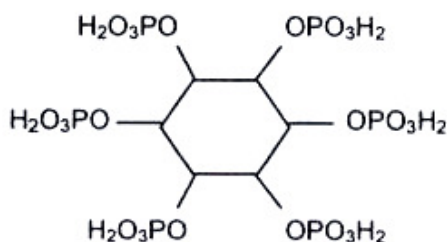


Figura 7. Estructura del hexafosfato de inositol ^[37]

Este compuesto es un anillo de seis carbonos, cada uno unido a un grupo fosfato. Cuando se establece el enlace ester, cada grupo fosfato permanece con dos grupos hidrógenos potencialmente reemplazables. Se ha sugerido, que esta estructura puede formar sales con iones de elementos comúnmente encontrados en los suelos, tales como el hierro, aluminio, calcio y magnesio ^[37].

Con respecto a los ácidos nucleicos, es probable que aporten solamente una pequeña fracción del fósforo orgánico, el cual no excede del 2% de la fracción orgánica total. La explicación más razonable a este hecho es que estos ácidos se mineralizan fácilmente y por tanto duran mucho menos tiempo en el suelo que los derivados estables del ácido fítico. Los lípidos, por su parte, son un grupo muy heterogéneo de sustancias y sus derivados fosforados, los fosfolípidos, también comprenden compuestos diferentes. Sin embargo, la fracción del fósforo orgánico en el suelo en este tipo de compuesto es muy pequeña, $\leq 1\%$ ^[37].

La degradación del material muerto proveniente de animales y plantas en los suelos, es un proceso biológico fundamental, porque el carbono (C) es recirculado como dióxido de carbono (CO_2), el nitrógeno (N) es transformado en amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-), y otros elementos asociados como el fósforo, azufre y otros micronutrientes son transformados a formas inorgánicas, que son las requeridas por las

plantas. En este proceso, parte de los nutrientes es asimilado por microorganismos e incorporados a la biomasa microbiana. La conversión de C, N, P y S a formas minerales es llamada mineralización; por otra parte, la asimilación por síntesis de células microbianas y otros organismos es llamada inmovilización ^[38].

Estos últimos procesos son dependientes y afectados por la naturaleza del suelo, la humedad, aireación, el pH y la temperatura del ambiente. También son dependientes de la relación C/P existente en la materia orgánica en descomposición, ya que a partir de esta relación se puede determinar la reacción predominante: mineralización o inmovilización, estableciendo como nivel crítico el valor de 200. Valores superiores indican que predominarán las reacciones de inmovilización (altos contenidos de carbono), y a valores inferiores predominarán las de mineralización (bajos contenidos de carbono) ^[39]. Los fosfatos recién precipitados (amorfos) pueden ser transformados en formas insolubles mediante un proceso de inmovilización química, la cual implica una mayor cristalinidad de los compuestos fosfatados. Por lo expuesto anteriormente, la materia orgánica debe ser primeramente mineralizada, a fin de generar iones inorgánicos (H_2PO_4^-) a la solución del suelo, que es la forma como la planta puede aprovechar mejor el fósforo ^[35].

1.2.4 Roca fosfórica

La roca fosfórica esta conformada por el mineral apatito ($\text{Ca}_5(\text{F,Cl,OH})(\text{PO}_4)_3$), constituyente accesorio de todas las rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas. La variedad colofana del apatito es el constituyente de la roca fosfórica o fosfática. La roca fosfática no se relaciona directamente con el contenido de fosfatos porque el contenido generalmente es de no más del 40% de P_2O_5 . El apatito cristalizado se ha usado en gran escala como fuente de fosfato para fertilizantes. Los depósitos de fosforita suministran la mayor parte del fosfato para fertilizantes. El fosfato de calcio se trata con

ácido sulfúrico para convertirlo en superfosfato y hacerlo así más soluble. Los apatitos se emplean también para obtener ácido fosfórico, y distintas sales, así como el fósforo. De los apatitos ricos en flúor se extrae ácido fluorosilícico, muy importante en la industria. En la industria cerámica se usa para fabricar una porcelana muy resistente. También se usa en la fabricación de detergentes y limpiadores industriales, al igual que como aditivo en la industria alimenticia y la fabricación de cremas dentales. El tricloruro de fósforo, pentasulfato de fósforo y otros compuestos obtenidos de la fosforita se usan en insecticidas, retardantes de fuego y otros ^[40].

1.2.5 Ciclo del fósforo

El ciclo del fósforo es sedimentario, su reservorio es la corteza terrestre. En la naturaleza, el fósforo forma parte de las rocas y los minerales del suelo. A medida que las rocas son erosionadas se van liberando compuestos fosfatados hacia el suelo y el agua, también puede ser suministrado por medio de fertilizantes minerales y orgánicos. Los fertilizantes minerales son compuestos inorgánicos de fósforo que se extraen de los grandes yacimientos de “roca fosfórica”, mientras que los fertilizantes orgánicos provienen del estiércol de animales y residuos de plantas. Estos compuestos fosfatados son absorbidos por las plantas, a través de las raíces, incorporándose así a los componentes vivos del sistema, mientras que pasan por los distintos niveles tróficos. Una vez que los organismos (plantas o animales) mueren, se descomponen y se libera el fósforo contenido en la materia orgánica ^[41]. Dado a que en este ciclo no se ha demostrado la presencia de formas gaseosas intermediarias, es conocido como ciclo local. Los principales pasos del ciclo del fósforo son su mineralización, el almacenamiento, el recambio en el reservorio del humus (mineralización) y su fijación química en el suelo (inmovilización), los fenómenos de adsorción y desorción y los procesos de precipitación y disolución, los cuales favorecen la disponibilidad del nutriente (P) ^[42]. En la Figura 8 se presenta el ciclo del fósforo.

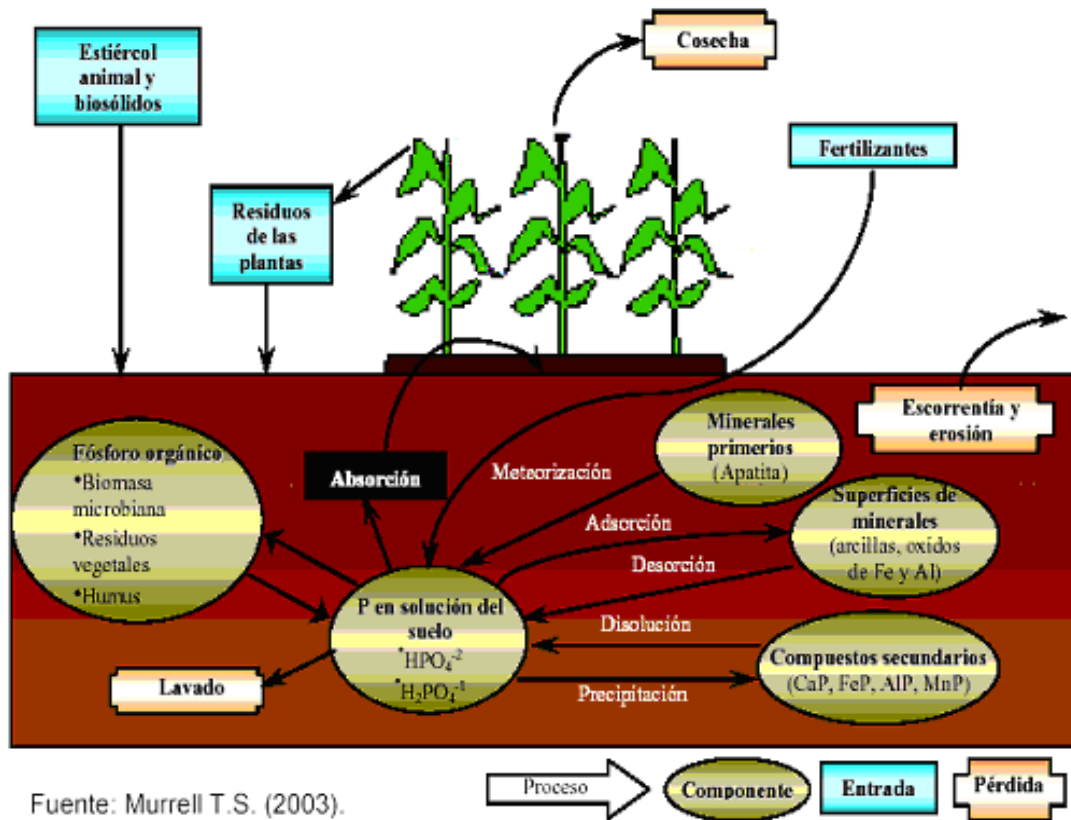


Figura 8. Ciclo del fósforo ^[42]

La salida o pérdida de P en el suelo, se produce por diferentes medios, entre los cuales se pueden mencionar; la extracción por el cultivo, erosión, escorrentía y lixiviación lo cual se puede esquematizar en la Figura 9. Factores climáticos como el viento y la precipitación favorecen la pérdida de P a través del proceso de erosión. Otro proceso de pérdida está dado por la infiltración a través del suelo hasta manantiales y drenajes, donde la cantidad de P transportada suele ser muy pequeña y difícil de medir con precisión. Las pérdidas en este proceso pueden variar considerablemente con los contenidos de P en el suelo, siendo mayores en los suelos sobre enriquecidos de P ^[42].

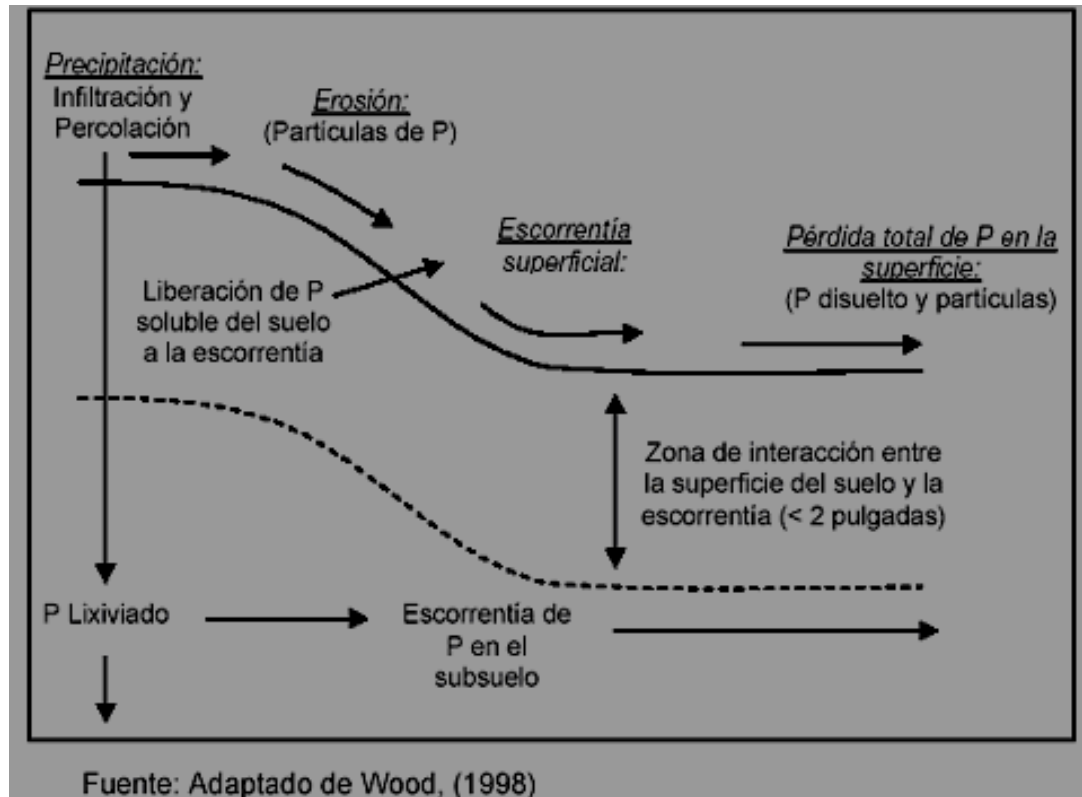
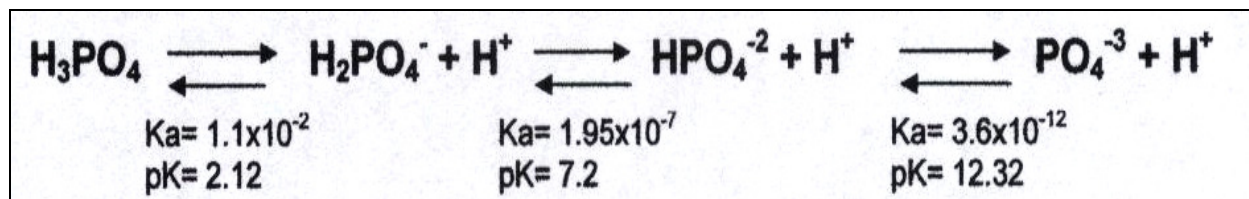


Figura 9. Proceso de transporte de fósforo en suelo ^[43]

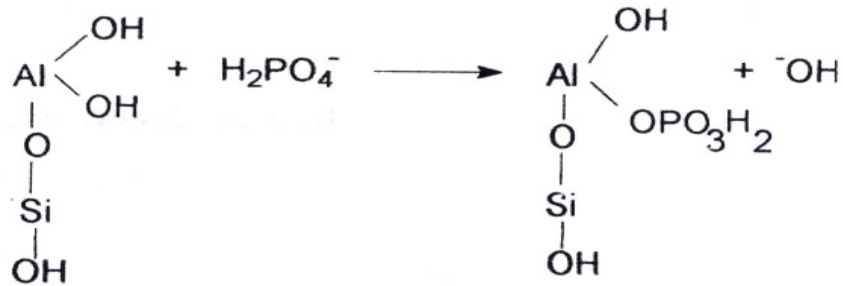
1.2.6 Dinámica del fósforo y principales reacciones

Los equilibrios de reacción entre las distintas formas de fósforo, dependen de los coloides y minerales presentes en el suelo, además del pH, la actividad microbiológica, la presencia de enzimas y ácidos orgánicos y la intensidad de la demanda de nutrientes ^[44]. Las formas iónicas del fósforo se encuentran condicionadas por el pH del medio, así, el ácido fosfórico se disocia de la siguiente manera ^[6]:

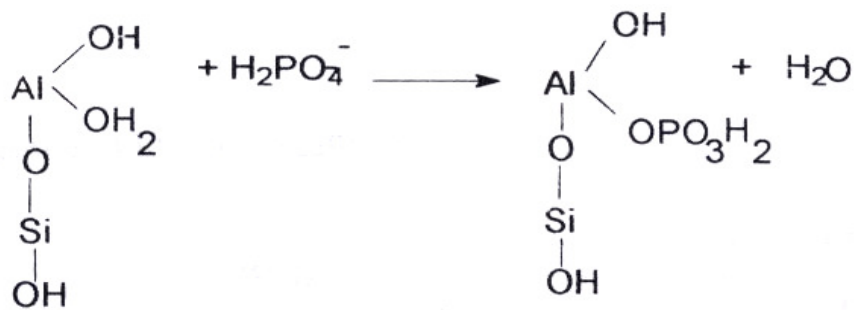


Dentro de las reacciones químicas que pueden involucrar al fósforo, tenemos ^[11]:

- 1) Reacciones por sustitución isomórfica: Estas ocurren cuando se está formando la red cristalina de algún mineral, son poco frecuentes y ocurren especialmente a elevadas temperaturas.
- 2) Reacciones por precipitación: Ocurren a distintos pH, (a pH ácido, con cationes como hierro y aluminio, y en condiciones básicas, con cationes como calcio). Tales reacciones están controladas por los productos de solubilidad de los compuestos formados.
- 3) Reacciones por procesos de adsorción específica o intercambio aniónico: Se tienen interacciones físicas y químicas, donde el grupo PO_4^{-3} se intercambia con grupos OH^- , lo cual se evidencia por un aumento del pH. Entre los mecanismos de adsorción del fósforo en el suelo, existen varias teorías propuestas para dilucidarlos:
 - 3.1) Adsorción por las arcillas. Enlaces insatisfechos:
 - a) Intercambios con grupos OH^- : Ocurren en condiciones ácidas y se evidencia por un aumento de pH.

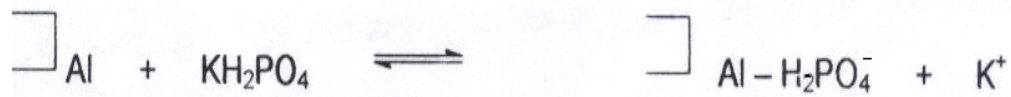


b) Intercambios con grupos OH_2 : Ocurren en condiciones más ácidas que las anteriores, no hay cambios de pH.

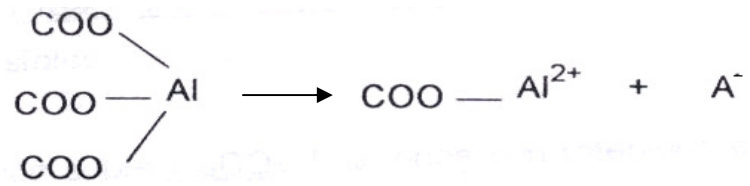


c) Puente con catión: Ocurre cuando el fosfato se enlaza a un catión con un enlace insatisfecho y se evidencia con un aumento en la capacidad de intercambio catiónico, puede ocurrir también con la materia orgánica.

Para un catión con un enlace insatisfecho:



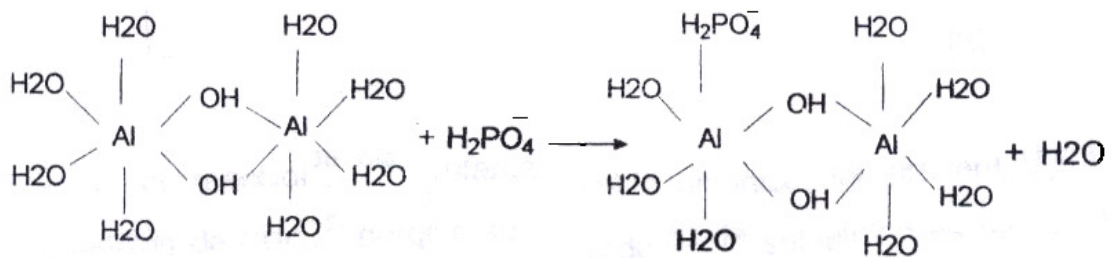
Para la materia orgánica:



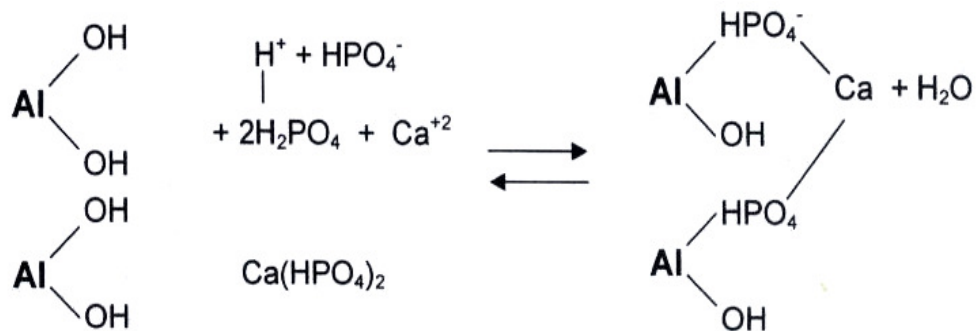
(El anión A^- puede intercambiarse)

3.2) Adsorción por hidróxidos de Fe y Al:

a) Fijación en polímeros de aluminio:



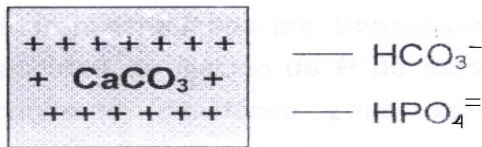
b) Adsorción en hidróxidos superficiales:



Adsorción –precipitación en suelos alcalinos:

c) Ocurren reacciones de precipitación: principalmente con calcio, formando apatitos y otros fosfatos.

d) Adsorción sobre CaCO_3 : los iones son retenidos en la superficie en forma intercambiable.



En estas reacciones de intercambio aniónico, se presenta un predominio en la adsorción de HPO_4^{2-} porque su producto de solubilidad es menor que el de cualquier otro anión ^[11].

1.2.7 Adsorción de fosfatos en los suelos

La adsorción es definida como el proceso de atracción de las moléculas o iones de una sustancia en la superficie de otra, y constituye el tipo más frecuente de adhesión en líquidos y gases sobre la superficie de sólidos ^[45]. La sustancia que se adsorbe es el adsorbato y el material sobre el cual lo hace es el adsorbente. El proceso inverso de la adsorción es la desorción ^[46].

La adsorción de fosfato se da sobre las superficies reactivas del suelo, en donde es posible que ocurra un intercambio de adsorción entre el ión hidroxilo (OH^-) y los iones fosfatos. Algunos trabajos señalan la posibilidad que el intercambio sea a través de OH^- y moléculas de agua coordinadas a las superficies metálicas con iones fosfatos. La especie iónica de fosfatos retenida está determinada por el pH. La materia orgánica

bien descompuesta puede desempeñar 2 papeles: adsorber fosfatos o bloquear potenciales sitios de adsorción en las superficies de partículas inorgánicas (arcillas y óxidos metálicos) ^[35].

Las características principales de la adsorción son:

- La adsorción es altamente selectiva. La cantidad adsorbida depende en gran medida de la naturaleza y del tratamiento previo al que se haya sometido a la superficie del adsorbente, así como de la naturaleza de la sustancia adsorbida. Al aumentar la superficie de adsorbente y la concentración de adsorbato, aumenta la cantidad adsorbida.
- En un sistema de fases sólido-gas es un proceso rápido cuya velocidad aumenta cuando aumenta la temperatura, pero desciende cuando aumenta la cantidad adsorbida. Dado que los procesos de adsorción son generalmente exotérmicos, al aumentar la temperatura disminuye la cantidad adsorbida. La adsorción física es rápida y se alcanza muy pronto el equilibrio, aún a temperaturas bajas. La quimisorción requiere de energía de activación; su velocidad es pequeña, excepto a temperaturas elevadas, y el equilibrio se establece lentamente.
- Es un proceso espontáneo, es decir, que la variación de la energía libre de Gibbs ∂G es negativa, y en general está asociada con un aumento en el orden del adsorbato, lo que significa que ∂S es negativa, por lo cual, y de acuerdo con la ecuación $\partial G = \partial H - T\partial S$, es generalmente exotérmica, lo que quiere decir que ∂H es negativo. El cambio en la entalpía cuando un mol de adsorbato es adsorbido por la cantidad apropiada del adsorbente se conoce como la entalpía de adsorción.

Atendiendo a las fuerzas de interacción entre las moléculas de adsorbente y adsorbato, se acepta la existencia de dos tipos fundamentales de adsorción. Cuando estas fuerzas son del tipo dipolo-dipolo, dipolo-dipolo inducido o fuerzas de dispersión, se usa el término de adsorción física o fisisorción. Cuando las fuerzas son enlaces covalentes se aplica el término de adsorción química o quimisorción. ^[46]

En los suelos por ser sistemas muy complejos y heterogéneos , actúan al mismo tiempo diferentes fuerzas de retención, una molécula adsorbida difiere apreciablemente de otras no adsorbidas de la misma especie, no solo por su movilidad restringida , sino porque se orienta y de ser posible se polariza bajo el efecto del adsorbente. Así mismo, en las superficies de tamaño constante la cantidad adsorbida dependerá entre otras cosas de la temperatura, por lo tanto la adsorción es el resultado del equilibrio entre fuerzas de atracción que inmovilizan a las partículas y la agitación térmica que las mueve ^[37].

Los suelos tienen poder adsorbente y convierten a los fosfatos solubles en formas adsorbidas con menor y mayor disponibilidad hacia la planta. Esa adsorción fue estudiada por numerosos autores quienes la expresaron por medio de isothermas en las que se muestran las cantidades de fósforo adsorbido de su concentración de equilibrio ^[47].

1.2.7.1 Isothermas de adsorción de P

Una isoterma de adsorción es una curva que relaciona la cantidad de una sustancia retenida en una interfase, con una concentración en equilibrio en el medio que se encuentra en contacto la interfase. La relación depende de la temperatura; por lo tanto, las curvas deben ser obtenidas a temperatura constante. Las isothermas más conocidas son las de Freundlich y la de Langmuir ^[35].

La isoterma de Freundlich implica la condición de que la adsorción química cae exponencialmente con el incremento en la superficie cubierta (θ), (Figura 10). Esta isoterma puede ser descrita como:

$$X = ac^{1/n} \quad (3)$$

Donde X = cantidad de fosfato adsorbido

a y n = son constantes

c = concentración de fosfato en el equilibrio.

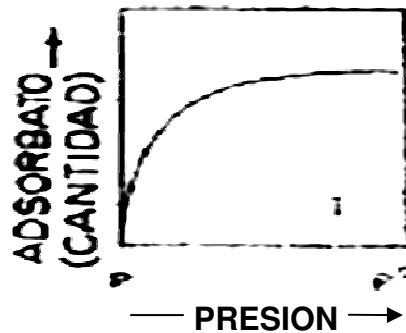


Figura 10. Isoterma de Freundlich ^[37]

Una ventaja de esta isoterma es que, por ser una ecuación empírica, no presupone nada y así no compromete al operario. Sin embargo por ser una curva cóncava, indica una adsorción limitada y la ecuación tampoco indica una adsorción máxima como se deriva de la ecuación de Langmuir, lo cual no corresponde a una propiedad real de los suelos, ya que los mismos son sistemas muy complejos caracterizados por una elevada adsorción de aniones entre ellos el fósforo. La deficiencia de este elemento, procede pues casi exclusivamente a la elevada estabilidad de las uniones químicas formadas al reaccionar el anión con las superficies adsorbentes de los coloides del suelo ^[37].

La isoterma de adsorción de Langmuir se derivó de una representación simplificada de los gases, se trata de una función hiperbólica; se estima que esta ecuación es de gran aplicabilidad en la química de suelos, aunque en ciertos casos parece ser necesario ampliarla, ya que la versión original fue derivada para sistemas más sencillos que los suelos ^[11]. Langmuir supone que después de establecer el equilibrio, una fracción θ de la superficie queda cubierta por moléculas adsorbidas, quedando una fracción $(1 - \theta)$ sin cubrir. La velocidad de adsorción es entonces proporcional a la concentración (c) de las moléculas en la fase líquida o gaseosa y también es proporcional a la fracción de la superficie que no esta recubierta. Se describe como:

$$\theta = \frac{ac}{1+ac} \quad (4)$$

En la adsorción de una solución lo común es la adsorción en monocapas, donde su espesor se encuentra determinado por el tamaño de las moléculas del adsorbato y su orientación con respecto a la superficie.

Al principio la adsorción crece proporcionalmente con la concentración, posteriormente ocurre una saturación de la superficie por una capa monomolecular del adsorbato, para luego permanecer constante al aumentar la concentración lo cual se representa en la Figura 11.

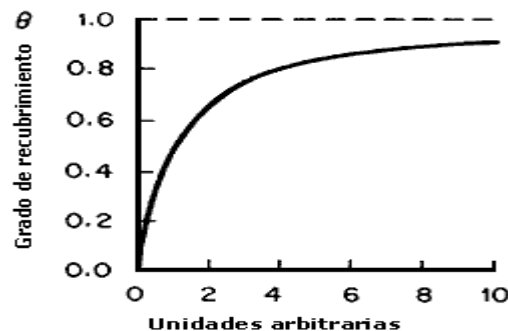


Figura 11. Isotherma de Langmuir ^[46].

La ecuación de Langmuir se puede llevar a una forma lineal quedando de la siguiente forma:

$$\frac{c}{x} = \frac{c}{X_m} + \frac{1}{kX_m} \text{ Forma lineal} \quad (5)$$

Donde C= concentración en el equilibrio

X= cantidad de sustancia adsorbida

X_m= adsorción máxima

K= constante relacionada con la energía de enlace.

A pesar que la ecuación de Langmuir tiene gran significado físico, muchas veces los datos de adsorción de fósforo no se ajustan a la misma y no puede utilizarse para explicar el proceso. Entre las limitaciones a su aplicación se encuentra las siguientes:

- Solo es correcta a niveles de concentración bajos que permitan formar la monocapa.
- Asume energía de enlace uniforme, pero esta es decreciente, pues la pendiente disminuye en forma constante.
- No considera las partículas que podrían desplazarse en el proceso de adsorción.

El valor práctico de ajustar las isothermas de adsorción, se debe a que las cantidades de fósforo determinada en las mismas generalmente son mucho menores que el total adsorbido; además, de las isothermas puede derivarse fácilmente la concentración de equilibrio ya que para la nutrición de las plantas se asume que una concentración aproximada de 0,2 mg/L en solución es normalmente adecuada para la mayoría ^[37].

Al estudiar las reacciones de fósforo en el suelo por medio de las isotermas de adsorción se ha encontrado ^[48] que la isoterma de Freundlich se aplica sobre un alto intervalo de concentraciones de fosfato en el equilibrio; sin embargo esta isoterma no permite calcular la adsorción máxima. La isoterma de Langmuir aunque se aplica a cantidades relativamente bajas de fósforo adsorbido (concentraciones de fósforo más diluidas) permite determinar cuando está expresada en su forma lineal, un máximo de adsorción. Este último punto es la principal ventaja de la isoterma de Langmuir sobre la de Freundlich.

La isoterma de Temkin nace cuando la caída de calor de adsorción es más lineal que logarítmica y es con esta clase de comportamiento que la misma tiene relación. La isoterma de Temkin se deriva de la de Langmuir si se inserta la condición de que el calor de adsorción decrece linealmente con θ ^[35]. En la región media de cobertura es posible reducir la ecuación a:

$$\frac{X}{X_m} = \frac{RT \ln A c}{b} \quad (6)$$

Donde A y b = constantes

R= constante universal de los gases

T= temperatura

Una muestra de este tipo de isoterma se presenta en la Figura 12.

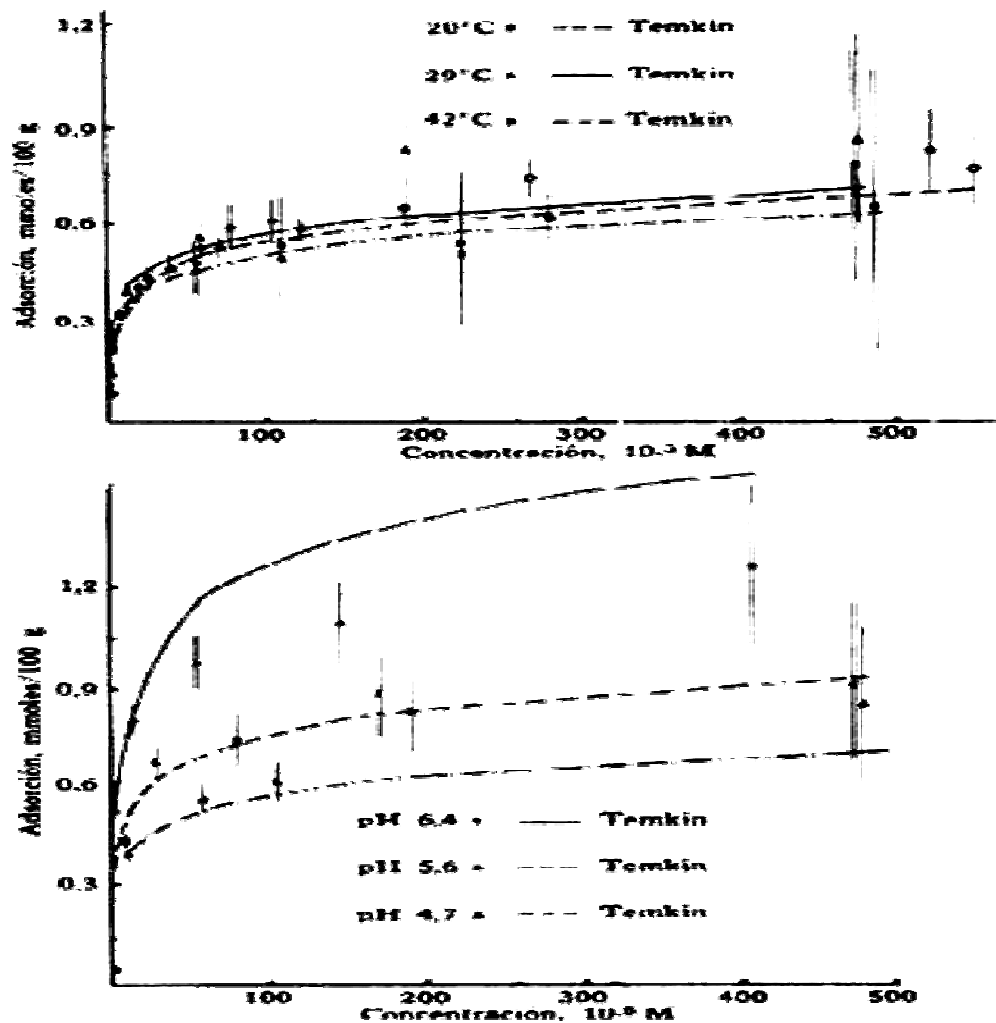


Figura 12. Isothermas de Temkin a diferentes pH y temperaturas ^[49].

1.3 ENMIENDAS ORGÁNICAS E INORGÁNICAS

Son materiales que favorecen las propiedades físicas y químicas del suelo, ya que poseen un contenido energético y elementos nutritivos que pueden ser reintroducidos en los ciclos biogeoquímicos de los distintos elementos ^[50]. Aportan materia orgánica al suelo y para suelos arenosos o con arcillas de baja actividad,

representa una mejora en las propiedades físicas, químicas y biológicas por su efecto acondicionador. De forma general, se recomiendan aplicar a los suelos de países templados dosis de enmiendas orgánicas de aproximadamente 20-50 t/ha cada 2-3 años, en otoño o primavera, unos dos meses antes de la siembra aprovechando la época de lluvia ^[51].

Existen por lo menos 13 elementos nutritivos esenciales que las plantas obtienen del suelo, pero dejando de un lado a los elementos micronutrientes quedan 3 elementos: el nitrógeno, el fósforo y el potasio, que cuando se usan acertadamente tienden a equilibrarse y suplementarse. Esta relación es muy importante en la práctica fertilizadora, ya que relaciona íntimamente con la economía y efectividad de los fertilizantes.

Dentro de las clases de enmiendas orgánicas se encuentran:

Los abonos verdes son plantas que se cultivan para beneficio del suelo. Es un tipo de cultivo de cobertura agregado primariamente para incorporar nutrientes y materia orgánica al suelo. Las plantas más utilizadas para este fin son las leguminosas por su capacidad para fijar el nitrógeno atmosférico, ya sean en asociaciones simbióticas o no. Estas siembras no se utilizan para el consumo, sino que se usan exclusivamente para incorporarlas a la tierra como fertilizante, por eso se las denomina abono "verde".

Los desechos orgánicos utilizados principalmente son los estiércoles de animales y los desechos agroindustriales, los cuales al añadirse al suelo cumplen 2 funciones principales: suministrar nutrientes a los cultivos, vía mineralización y mantener las formas orgánicas del suelo, vía humificación ^[50].

El compostaje es el proceso de descomposición de la materia orgánica proveniente de materiales que la contienen, por medio de una gran variedad de microorganismos en un medio húmedo y aireado para dar en su etapa final un material rico en humus, muy utilizado en el mejoramiento de suelos empobrecidos y agotados ^[52].

El uso de las enmiendas orgánicas presenta las siguientes ventajas:

- Aumento de la capacidad de intercambio catiónico del suelo.
- Aumento de la capacidad de regulación química del suelo.
- Aporte de sustancias de crecimiento.
- Aumento en la disponibilidad de micronutrientes, no solo por ser fuente, sino principalmente por los cationes micronutrientes quelatados.
- Aumento de la disponibilidad de fósforo, no solo por su aporte directo, sino también al reducir la cantidad de compuestos insolubles de hierro y aluminio.
- Mejora la estructura del suelo, promoviendo mayor aireación y crecimiento radical.
- Aumento de la capacidad de retención de agua

Y las siguientes desventajas:

- La mayoría de las enmiendas orgánicas no pueden ser utilizadas por las plantas inmediatamente, ya que son de lenta liberación de nutrientes para la solución del suelo.
- Escasez de enmiendas con diferente composición química.
- Contaminación del medio ambiente (metales pesados, olores, metano entre otros), durante su descomposición. El grado de contaminación se dará según el material de origen ^[53].

- El uso de estiércol fresco que no sea adecuadamente tratado puede transmitir microorganismos patógenos, como por ejemplo: *Salmonella*, *Campylobacter*, *Cryptosporidium* y *Escherichia coli*, entre otros.
- El uso del compostaje puede conllevar a la pérdida de N y otros nutrientes.

Dado que la aplicación de las enmiendas orgánicas resultan poco rentables para la producción de cultivos a gran escala, ha sido necesaria la búsqueda de nuevas alternativas que permitan mejorar las condiciones de los suelos ácidos, una de ellas, es la utilización de las emulsiones asfálticas. La existencia de importantes reservas de crudos en el país y dado que la aplicación de estas emulsiones no ejercen efectos negativos sobre el ecosistema han despertado el interés por conocer la composición, comportamiento, estructura, tipos y ventajas de dichas emulsiones.

1.4 EMULSIONES ASFÁLTICAS

Las emulsiones se definen como una mezcla íntima y estable de dos compuestos normalmente inmiscibles, donde uno de estos se dispersa en forma de partículas de muy pequeño tamaño (de 1 y 0.001 μm) ^[54]. Se encuentran formadas por dos fases parciales o totalmente inmiscibles, una fase llamada continua (o dispersante) y la otra llamada discreta (o dispersa).

El asfalto es una mezcla de numerosos hidrocarburos parafínicos, aromáticos y compuestos heterocíclicos que contienen azufre, nitrógeno y oxígeno, solubles en su totalidad en sulfuro de carbono, tolueno y benceno. Este material es considerado como un material coloidal, formado por micelas de tamaños cercanos a la micra (fase asfáltica), las cuales están suspendidas en una fase aceitosa de alta viscosidad (fase malténica) ^[55].

Mediante el empleo de disolventes selectivos (pentano, hexano y heptano) es posible separar del asfalto dos grandes grupos de componentes conocidos como asfáltenos y maltenos. Los primeros son sólidos quebradizos que no funden. Los maltenos están constituidos a su vez por una fracción saturada (aceite) y por otra aromática (resinas). El asfálteno es uno de los componentes del asfalto el cual al mezclarse con una matriz acuosa forman las llamadas emulsiones asfálticas.

En las emulsiones asfálticas aceite en agua (aceite/agua), la fase continua o dispersora es el agua y la dispersa es el aceite. Se encuentran compuestas por aceite, agua y un agente emulsificante que en algunas ocasiones puede contener un catalizador. En general suelen contener agentes emulsificantes en concentraciones de 0,5% a 25%, catalizadores de 0,1% a 0,3% (cuando los llevan) y entre un 50% a 70% de cemento asfáltico, quedando entre un 30% a 40% de agua ^[56].

Los emulsificantes son compuestos orgánicos de peso molecular relativamente elevado (entre 100 y 300 g/mol); tienen una parte hidrofóbica (generalmente es una cadena hidrocarbonada ya sea lineal o cíclica) que es soluble en el medio orgánico y una parte soluble en medio acuoso (generalmente es un grupo polar del tipo orgánico o inorgánico) ^[56]. El componente hidrofóbico (radical alquilo) es uno de los componentes de los emulsificantes. El otro está representado por la parte hidrofílica. Ambos se encuentran saponificados y en contacto con el agua ocurre la disociación, quedando con cargas negativas o positivas según el tipo de emulsificante. De esta manera, los emulsificantes aniónicos, tienen grupos ácidos en su parte hidrofílica, con carga eléctrica negativa y fórmula molecular R-COONa. Cuando este tipo de emulsificante se encuentra en un medio acuoso se disocia resultando:



Y el grupo carboxilo COO^- se va a la parte hidrofílica, mientras que el radical se queda en la parte hidrofóbica.

Los emulsificantes catiónicos son generalmente grupos aminos con cargas eléctricas positivas y con fórmula general $\text{R-NH}_3\text{Cl}$. Cuando este tipo de emulsificante actúa en un medio acuoso se disocia resultando:



Y el grupo amino se va a la parte hidrofílica mientras que el radical alquilo se queda en la parte hidrofóbica.

Los emulsificantes – una vez producida la emulsión- son los que se sitúan en su mayor parte en la interfase. Su parte hidrofóbica se dirige hacia el asfalto y su parte polar hacia el agua. Con estos emulsificantes iónicos las partículas adquieren cargas eléctricas del mismo signo, repeliéndose entre ellos y estabilizándose el sistema. De allí nacen los tipos de emulsiones asfálticas de acuerdo al emulgente usado: Emulsiones aniónicas y Emulsiones catiónicas.

También de acuerdo a la estabilidad de las emulsiones asfálticas se pueden clasificar en:

- ✓De rompimiento rápido.
- ✓De rompimiento lento.
- ✓De rompimiento medio.
- ✓Para impregnación.
- ✓Súper estables.

La ruptura de la emulsión consiste en la demolición de la película protectora, que envuelve a los glóbulos de asfalto, con la consecuente unión de los mismos, ocurriendo la separación del asfalto y el agua de la emulsión. La destrucción de dicha película protectora, se debe a fenómenos físicos y químicos tales como: mezclado, absorción de los agregados, evaporación del agua, atracción electromagnética entre el agregado y el emulsificante que rodea al glóbulo de asfalto ^[54].

Entre las ventajas más importantes de las emulsiones asfálticas se encuentran:

- Es un ligante asfáltico no contaminante ni peligroso, ya que contienen del 35 a 40 % de agua como solvente.
- Su manejo es sencillo y seguro, gracias a su baja viscosidad a temperatura ambiente.
- Presenta bajo costo de la fase dispersante, que es agua.
- Tiene una gran adhesión con cualquier agregado, a pesar de condiciones de humedad adversas, debido a la enorme dispersión de las partículas de asfalto, de tamaño muy pequeño y el uso de agentes emulsificantes de tipo catiónico.
- El equipo de aplicación es más sencillo debido a que todos sus componentes se aplican a temperatura ambiente.
- Por su aplicación en frío ayuda a no alterar el medio ambiente y queda suprimida la emisión de humos o gases.
- Por ser la emulsión un potencial acondicionador y no un abono. Es esta una propiedad muy importante en comparación con los abonos orgánicos, los cuales contaminan el ambiente.
- Empleando el agua como solvente no crea problemas de su desperdicio, ya que es recuperable.

Las desventajas de las emulsiones asfálticas son principalmente el tiempo de fraguado (lapso necesario para que la mezcla pase del estado fluido al sólido), la complicada química y reología que se desarrolla en las emulsiones, pues los compuestos químicos presentes en el asfalto como los asfáltenos y maltenos, son variables y de diferente naturaleza química.

1.5 ANTECEDENTES

Se presentan a continuación, los antecedentes más relevantes de estudio en suelos con distintas enmiendas orgánicas en donde se evaluó la cantidad de P adsorbido; y luego los referidos a suelos tratados con emulsiones asfálticas, los cuales son de interés para el desarrollo de este trabajo.

1.5.1 Adsorción de fósforo en los suelos

Dada la actual necesidad de incrementar la fertilidad de los suelos para satisfacer las demandas alimenticias, numerosos investigadores a nivel mundial han enfocado sus trabajos al estudio del comportamiento del fósforo en el suelo y de los mecanismos y principios que gobiernan los fenómenos de adsorción de este elemento. A continuación se presentan algunos de los trabajos:

Deb y Datta 1967: Comprobaron que la presencia de aniones orgánicos e inorgánicos lograba disminuir la retención de fósforo por los suelos y que la eficacia de estos aniones, dependía tanto de su naturaleza físico-química, como de la concentración de fósforo y pH del suelo ^[57].

Nagarajah y col. 1970: Observaron experimentalmente que los ácidos orgánicos eran capaces de reducir la cantidad de fósforo adsorbido en caolinita, gibsita y goetita, indicando que estos ácidos, podían ser adsorbidos mediante cambio de ligando en la superficie mineral y, de este modo competir con el fosfato por los lugares de adsorción ^[58].

Barrow 1970: Comparó la adsorción de fosfatos en molibdatos y sulfatos de un suelo ácido a través de isotermas de adsorción. Como resultado después de la agitación durante 24 horas obtuvo que los valores de pH decrecieron de 6 a 4 y la relación sulfato/fosfato y molibdato/fosfato se incrementó. De su trabajo pudo concluir que la relación de estos compuestos con el pH era consistente con la hipótesis, de que la adsorción ocurre cuando iones capaces de adsorber un protón o iones capaces de donar un protón lo hacen simultáneamente en la interfase que se adsorbe con la solución ^[59].

Parfitt 1979 y Reddy y col. 1980: Indicaron la existencia de un efecto competitivo entre la materia orgánica y el fosfato por los lugares de adsorción en los suelos debido probablemente, a la habilidad quelatante de los grupos hidroxilos y carboxilo de la materia orgánica del suelo ^[60] ^[61].

Sibanda y Young 1986: Mostraron que los ácidos húmicos y fúlvicos, compiten fuertemente con el fosfato por los lugares de adsorción a bajos valores de pH ^[62].

López –Hernández y col. 1986: Indicaron que la presencia de aniones orgánicos (oxalato y malato) generalmente presentes en la rizosfera reducen los niveles de adsorción de fosfato por los suelos, lo cual va a depender de la concentración del ligando orgánico y también del momento en el cual se añadió el fosfato (antes o después de la adición de los aniones orgánicos). Los resultados evidenciaron que aparentemente los dos aniones estudiados fueron capaces de ocupar los sitios de

adsorción de fosfato en las superficies activas de suelos ácidos y calcáreos y modificar en forma drástica la isoterma resultante ^[63].

Faria y col. 1987: Determinaron que la aplicación de aniones, tanto orgánicos como inorgánicos, disminuía la capacidad de fósforo retenido por los suelos. Así mismo mostraron que el efecto era menor a medida que aumentaba la cantidad de fósforo añadida ^[64].

Kafkafi y col. 1988: Estudiaron la competencia de algunos aniones tanto orgánicos como inorgánicos (componentes de exudados radicales) con el P por los lugares de adsorción en montmorillonitas y caolinitas. Comprobando así que el efecto competitivo dependía tanto de la naturaleza del anión como del pH del medio y observaron que el efecto competitivo era mayor a medida que el pH del medio disminuía ^[65].

Vázquez y Morales 2000: Estudiaron la adsorción de fósforo en suelos ácidos de Misiones (Argentina). Las isotermas de adsorción fueron determinadas por el método de Fox y Kamprath (1970) y realizaron los modelos de Freundlich y Langmuir para compararlos. Obtuvieron como resultado que la ecuación de Freundlich produjo los mejores ajustes del P adsorbido a concentraciones altas. Mientras que a concentraciones bajas, el modelo de Langmuir presentó un mejor comportamiento que el modelo de Freundlich. Al combinar los dos métodos, se obtuvo un mejor ajuste de los valores experimentales comparado con las ecuaciones de Freundlich y Langmuir, para todo el rango de concentraciones. Concluyen que el modelo combinado de Langmuir-Freundlich es el más adecuado para describir la adsorción de fósforo de los suelos de misiones (Argentina), logrando un mejor ajuste a bajas, medias y altas concentraciones ^[66].

De todo lo expuesto anteriormente se deduce, que cuando se trata de suelos con muy elevada capacidad de adsorción de fósforo, como es el caso de los suelos ácidos

de sabana, el mantenimiento de una concentración adecuada de fósforo en la solución de equilibrio para el crecimiento de los cultivos, solo puede lograrse bien a través de la aplicación de dosis de fertilizantes fosfatados, lo cual implicaría un costo económico muy elevado, o bien a través de la investigación de vías alternativas, para lograr disminuir la elevada capacidad de adsorción de fósforo.

1.5.2 Emulsiones asfálticas

El uso de las emulsiones tanto aniónicas como catiónicas en forma directa, ha indicado la potencialidad de esta alternativa en el área agrícola, tanto a nivel internacional como ahora en el nacional.

Pla y col. 1981: Utilizaron emulsiones asfálticas (95 % cemento asfáltico y 5 % de emulsificante) en una relación asfalto/agua de 1/6 y de 1/12 sobre 9 suelos potencialmente agrícolas (agricultura de secano) de Los Llanos de Venezuela. Los autores indican que las emulsiones pueden ser mezcladas y aplicadas conjuntamente con herbicidas y fertilizantes líquidos. Concluyen que las emulsiones estabilizan los agregados del suelo superficial frente al impacto de las gotas de lluvia y minimizan las pérdidas por evaporación del agua de lluvia almacenada en el suelo ^[13].

Pla y col. 1983: Estudiaron el uso de emulsiones de asfalto para incrementar y regular la productividad de sorgo en un Alfisol franco arenoso de Los Llanos ondulados del norte del estado Guárico. Entre sus resultados destacan un aumento en las tasas de infiltración, de 20 T/ha en el suelo sin tratar a 100 T/ha en el suelo tratado con emulsión, lo que los lleva a asumir que las pérdidas por escorrentía en el caso del suelo tratado eran insignificantes, mientras que en el suelo sin tratar disminuye la infiltración debido al sellado superficial por el impacto de las gotas de lluvia. Llegan a la conclusión de que con la aplicación de una fina película de emulsión de asfalto en la superficie del suelo,

se logra un aumento en la producción total del cultivo, al evitar el déficit de agua y reducir las pérdidas del suelo por erosión ^[67].

Lobo y col. 1983: utilizaron emulsión catiónica (95 % de cemento asfáltico y 5% de emulsificante) en aspersión superficial sobre suelo (Ultisol) seco de la estación Experimental de Guanipa, en una suspensión con una relación asfalto/agua de 1/6, a razón de 1 T/ha. Los resultados indicaron que se duplicó el rendimiento del maní con el tratamiento de suelo con asfalto. Las aplicaciones superficiales de emulsiones asfálticas contribuyen notablemente a la conservación del agua en el suelo superficial, especialmente en la etapa inicial del cultivo, haciendo el régimen hídrico más regular frente a la irregularidad de las lluvias ^[14].

Salem y col. 1985: Evaluaron el efecto de las emulsiones asfálticas sobre la retención y liberación de algunos elementos nutrientes, metales pesados y agregación en dos muestras de suelos, provenientes de Egipto y Bélgica respectivamente. La emulsión fue aplicada en dosis severa para promover la formación de agregados, estabilizarlos y hacer las muestras de suelo más hidrofóbicas. Ellos concluyen que las emulsiones asfálticas pueden ser usadas para reducir la pérdida de nutrientes y para incrementar el estado de agregación y la estabilidad de los agregados en suelos arenosos. Demostraron, además que las emulsiones asfálticas pueden ser usadas para disminuir los niveles de Fe, Zn, Mn, Cu, Cd y Pb en suelos contaminados, característica ventajosa de las emulsiones ^[68].

Sánchez 1999: Evaluó el efecto de la incorporación de abonos orgánicos: gallinaza y pulpa de café (en dosis de 8 y 16 T/ha) y la aplicación superficial de emulsión asfáltica (en dosis de 1.5 T/ha) sobre las pérdidas de suelo, agua, nutrientes y el rendimiento de cebollín. Los resultados indicaron una mayor eficiencia con la emulsión asfáltica (EA), con reducciones de pérdidas de suelo y agua del 90 % y 67 % respectivamente, resultando por consiguiente con las menores pérdidas de nutrientes. Los abonos

orgánicos (AO) no mostraron diferencias estadísticamente significativas con respecto al testigo en cuanto a eficiencia sobre las variables señaladas. Por otra parte se encontró que tanto los AO como la EA produjeron un efecto positivo sobre aquellas condiciones relacionadas con el comportamiento mecánico del suelo, la aireación y la dinámica del agua, sobresaliendo el tratamiento con EA; sin embargo no se encontraron diferencias en relación a la estabilidad estructural del suelo al comparar el testigo con el resto de los tratamientos ^[69].

Fortún y Fortún 2005: Cuantificaron los agregados de dos tipos de suelos (arcilloso y arenoso-arcilloso) tratados con emulsión asfáltica catiónica y otras enmiendas orgánicas utilizando microscopía electrónica de exploración. Los mejores resultados obtenidos en cuanto a la estabilidad de los agregados fueron para el suelo arcilloso enmendado, mientras que la emulsión asfáltica como tratamiento incrementó el tamaño y la estabilidad de los agregados para ambos suelos. Concluyen que las emulsiones asfálticas mejoran la estructura de ambos suelos, debido al efecto cementante de la emulsión y cuando esta emulsión es mezclada con otras enmiendas orgánicas (estiércol y paja) la estructura mejora, lo cual se debe al efecto pegajoso y a procesos de micro-agregación ^[70].

Herrera 2007: Estudió los cambios de adsorción de fósforo en presencia de diferentes dosis (1,3 y 6 T/ha) de emulsión asfáltica catiónica y aniónica, en un suelo ubicado al sur-oeste del estado Anzoátegui. Las isothermas de adsorción que obtuvo se ajustaron mejor al modelo de Freundlich, mostrando una disminución en la cantidad de fósforo adsorbido con los tratamientos aplicados en un rango más amplio de concentración, mientras que las isothermas de Langmuir se ajustaron solo a bajas concentraciones. Concluyo que la presencia de las emulsiones afectaba notablemente la adsorción de fosfato y que este efecto dependía de la manera en la cual eran añadidos el fosfato y la emulsión; sin embargo no observó diferencias significativas entre las dosis aplicadas y el tipo de emulsión ^[71].

Morales 2008: Evaluó el efecto combinado de las emulsiones asfálticas, catiónica (EC) y aniónica (EA) sobre la adsorción de fósforo(P) en un Ultisol ácido, de drenaje interno rápido, ubicado en sabanas al sur-oeste del estado Anzoátegui. Utilizó 6 tratamientos y aplicó las emulsiones a razón de 1,5 T/ha sobre el suelo incubándolo durante 15 días. Las isothermas de adsorción se obtuvieron a partir de concentraciones altas de P. De los resultados obtenidos pudo concluir que en el caso de EC ocurren interacciones de tipo electrostática, sin transferencia, entre la emulsión y la superficie, actuando como agente bloqueador de los sitios de adsorción de P, en tanto que, la EA actuó como un anión específicamente adsorbido, retenido a través de uniones químicas. El modelo de Freundlich presentó el mejor ajuste para todo el intervalo de concentraciones trabajadas, mientras que, el modelo de Langmuir sólo se ajustó a concentraciones bajas de P ^[72].

De todo lo expuesto anteriormente se deduce, que cuando se trata de suelos con muy elevada capacidad de adsorción de fósforo, como es el caso de los suelos ácidos de sabana, el mantenimiento de una concentración adecuada de fósforo en la solución de equilibrio, solo puede lograrse a través de la aplicación de dosis elevadas de fertilizantes fosfatados, lo cual implica un costo económico muy alto y agronómicamente no rentable. Es por ello importante, seguir profundizando las investigaciones para así buscar vías alternativas que logren disminuir la elevada capacidad de adsorción de fósforo; pudiéndose considerar a las emulsiones asfálticas como enmiendas mejoradoras de suelo.

A continuación se presentan los objetivos propuestos en la realización de esta TEG.

OBJETIVOS

GENERAL.

- Determinar el efecto de las emulsiones asfálticas y la roca fosfórica sobre la adsorción de P en suelos ácidos de sabanas de pedogénesis contrastantes

ESPECÍFICOS.

- Determinar el efecto de las emulsiones asfálticas aceite en agua sobre la adsorción de P en suelos ácidos de sabana de pedogénesis contrastantes.
- Determinar el efecto de la roca fosfórica sobre la adsorción de P en suelos ácidos de sabanas de pedogénesis contrastantes.
- Determinar el efecto de diferentes dosis (0,13-6,67) Mg/ha de las emulsiones asfálticas aceite en agua sobre la adsorción utilizando un punto medio de las isothermas de adsorción de P de los suelos en estudio.

CAPITULO II

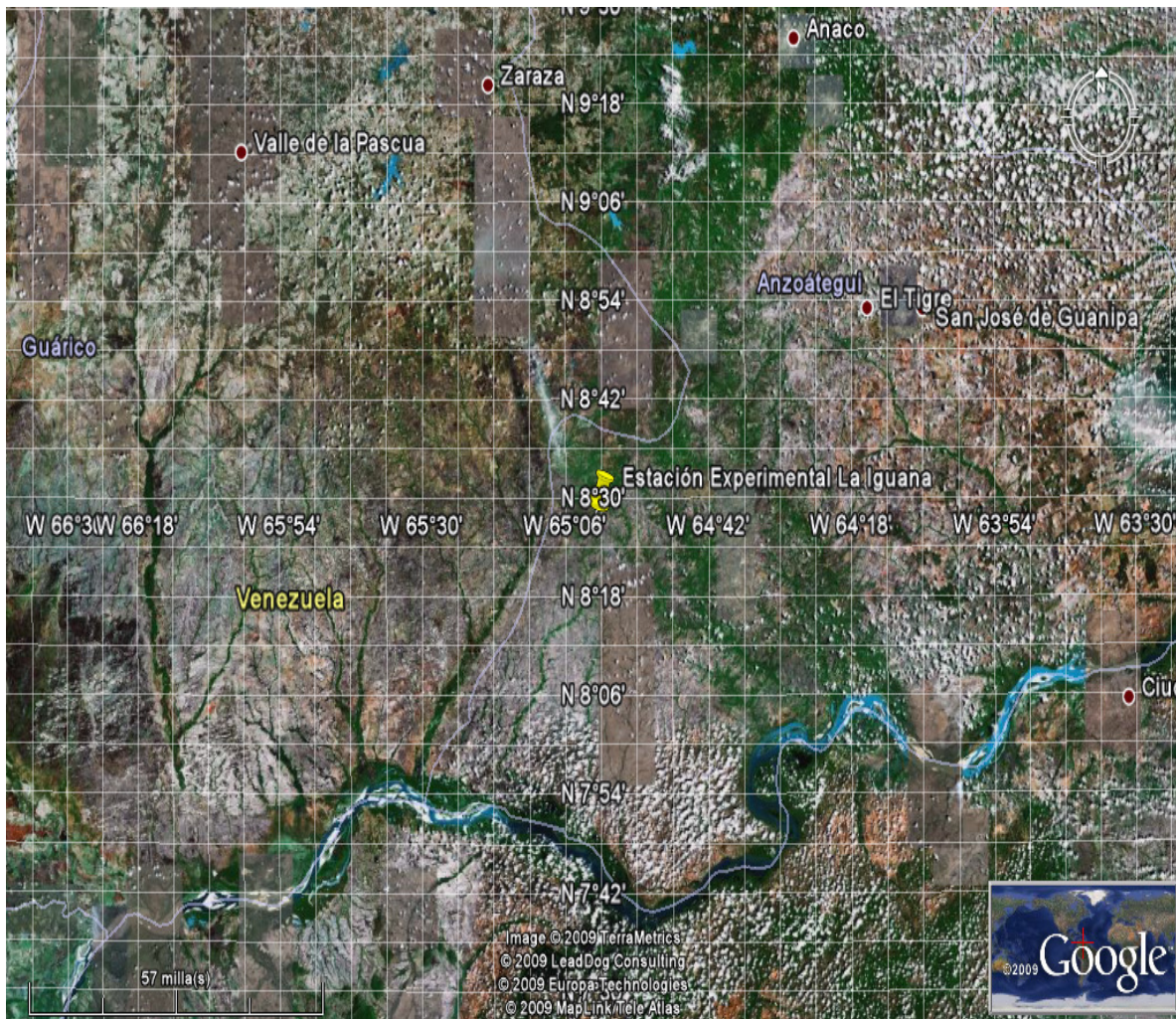
PARTE EXPERIMENTAL

2.1 ZONA DE ESTUDIO

La zona objeto de estudio, está ubicada en Los Llanos Centrales Venezolanos. Estos se han visto negativamente impactados por las actividades económicas que se realizan o se han realizado en ellos. Recientemente se han visto sumamente influenciados por la explotación de la faja petrolera del Orinoco, lo que ha generado un desarrollo acelerado de las ciudades involucradas en la actividad petrolera, con un consecuente aumento poblacional en las mismas y por ende un incremento en la necesidad de una mayor producción de alimentos. De esta zona las características con mayor relevancia a mencionar son:

2.1.1 Ubicación Geográfica

La zona de estudio pertenece a la Estación Experimental La Iguana, fue fundada en 1979 y está adscrita a la Universidad Nacional Experimental Simón Rodríguez. Se encuentra ubicada en el centro del país, en Los Llanos Centrales estacionalmente secos del río Orinoco en el estado Guárico (Municipio Santa María de Ipire) y abarca cerca de 3.200 hectáreas de sabanas bien drenadas, muy frágiles por la baja fertilidad de sus suelos ^[73].



8°25'56.78"N 65°01'53.03" O elev. 442 pie(s) Alto 193,999 milla (s)

Figura 13. Ubicación Geográfica de la Estación Experimental la Iguana (Google Earth)

2.1.2 Clima

En la región la temperatura media oscila entre 26 y 30°C y la precipitación anual entre 1100 y 1400 mm. La humedad relativa es de 77% y la evaporación promedio anual es de 2300 mm ^[74].

2.1.3 Litología

La zona se encuentra enmarcada dentro de la Formación Mesa y consiste de arenas de grano grueso y gravas, con cemento ferruginoso cementadas y muy duras; conglomerado rojo a casi negro, arenas blanco-amarillentas, rojo y púrpura, con estratificación cruzada; además contiene lentes discontinuos de arcilla fina arenosa y lentes de Limolita. En los llanos centro-orientales, la formación, está constituida por arenas no compactadas. Los sedimentos de la Formación Mesa, gradan de norte a sur, de más gruesos a más finos al alejarse de las cadenas montañosas del norte; desde la parte central de Monagas al macizo de Guyana, gradan de más finos a más gruesos ^[75]. En general el material proviene de varios ríos, posiblemente Caura, Cuchivero y Orinoco, probablemente de un manto espeso de alteración derivado de las rocas ígneas y metamórficas del escudo ^[76].

Los horizontes superficiales están fuertemente lixiviados, tienen poca cohesión y son fácilmente movilizables por el escurrimiento difuso. El material arenoso lavado es arrastrado, acumulándose en pequeñas depresiones. Los sequióxidos de hierro y las pocas cantidades de arcillas contenidas en los horizontes superficiales del material de la Mesa, han sido acumuladas en un horizonte B de color marrón rojizo ^[77].

2.1.4 Suelos

Los suelos de esta zona son pobres en nutrientes, con pH ácido, poca retención de humedad, disponibilidad de fósforo muy baja, baja capacidad de intercambio catiónico y de porcentaje de saturación con base, encontrándose desde suelos arcillosos hasta areno-arcillosos ^[74]. Los suelos que predominan en el área de estudio son los Ultisoles (Plinthic y Aquic Paleustults), los cuales se localizan en los topes y

laderas de colinas. Los Entisoles son característicos de las dunas (Ustoxic Quartzipsamments). Los Vertisoles (Entic Chromustert y Entic Pellusterts), dominan en las laderas y depresiones donde aflora la formación Oficina (lutitas). Los Inceptisoles (Typic Tropaquepts) se localizan en algunos bajos, junto con algunos Oxisoles (Typic Ochraquoxs). También se reportan Alfisoles (Aeric Tropaqualfs) formando bajos interdunarios. Los suelos se ubican mayormente dentro de la clase III por capacidad de uso, debido fundamentalmente a su baja fertilidad natural, la cual es un reflejo del bajo contenido de bases cambiables, pH ácidos (generalmente acompañado de alto contenido de aluminio), baja capacidad de retención de nutrientes, y poco contenido de materia orgánica ^[77].

2.1.5 Bioma y Vegetación

La Estación Experimental La Iguana se encuentra en una zona de transición entre la de colinas y de sabanas propiamente dichas. Allí, se presentan una serie de paisajes que van desde un bosque deciduo, espinares, palmares de *Copernicia tectorum* hasta llegar a sabanas con diferentes gradientes de presencia de árboles, tales como *Byrsonima crassifolia*, *Bowdichia virgilioides* y *Curatella americana*, entre otras, así como un alto predominio de gramíneas del género *Trachypogon* ^[73].

Luego de establecidas la ubicación y las características predominantes de la zona de estudio, se fijaron las metodologías a utilizar en el muestreo de campo y en los análisis químicos de laboratorio, con el fin de dar cumplimiento a los objetivos propuestos.

2.2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología experimental se desarrolló en varias etapas, que involucraron en primer lugar el trabajo de campo y en segundo lugar el análisis de laboratorio.

2.2.1 En Campo

En el campo se realizó la delimitación de la zona y se procedió a la toma de las muestras.

2.2.1.1 MUESTREO

El muestreo se realizó en dos órdenes de suelo, una con una muy alta capacidad de retención de P (Ultisol) y otra con una muy baja capacidad de retención de P (Entisol). Los suelos se encontraban bastantes cercanos el uno del otro y la vegetación natural estaba compuesta principalmente por *Trachypogon sp.*

En las parcelas se cortó hasta la base de la macolla la vegetación aérea. Para luego añadirle al voleo una dosis de 50 ppm de P, como roca fosfórica. A los dos meses se realizó el muestro (0-10 cm) de ambos ordenes de suelos tanto en las parcelas abonadas con fertilizantes como en la parcela control.

2.2.2 En el Laboratorio

Los monolitos muestreados se aclimataron a las condiciones del laboratorio y luego se trataron con las emulsiones asfálticas.

2.2.2.1 Características de las Emulsiones y de la roca fosfórica

Las emulsiones asfálticas catiónicas y aniónicas fueron suministradas por la industria petrolera (PDVSA-INTEVEP) para fines de contribuir con el proyecto U.C.V.- INTEVEP vigente N° 2005-00051/2005-019. Se caracterizan por ser de rompimiento lento (aproximadamente 24h), tienen un contenido de asfalto comprendido entre 50-70%, son del tipo aceite en agua y tienen una densidad que oscila entre 1,02 g/mL (emulsión catiónica) y 1,1 g/mL (emulsión aniónica). Estas emulsiones son provenientes del Crudo Boscán suministrado por industrias IPA ubicadas en Maracay- Edo. Aragua.

La roca fosfórica que se empleo, pertenece a la formación Riecito ubicada en el distrito Acosta (suroriente del estado Falcón) y corresponde al Mioceno Temprano a Medio. Se caracteriza, por presentar calizas arenosas en la base, fosilíferas y poco consolidadas; calizas fosfáticas gris claro a marrón oscuro, cuarzosas y cavernosas, continuando con calizas arrecifales de color marrón a gris claro, densas, duras y muy fosilíferas. Finalmente, se pueden encontrar un conjunto de sedimentos lacustres, compuestos por arcillas rojo-amarillentas, arenosas y calcáreas, además de arenas conglomeráticas de colores amarillento, rojizo y marrón claro. En los sedimentos se encuentran fósiles de moluscos como *Turritella abrupta* y foraminíferos del género *Miogypsina*, *Amphistegina*, etc. Esta formación, contiene importantes yacimientos fosfáticos, cuya evaluación volumétrica ha sido estudiada en bloques con alto tenor fosfático ^[78].

2.2.2.2 Pre-Tratamiento de la muestra

Se tomaron aproximadamente 150 g de cada tres muestras, se mezclaron y se obtuvieron mezclas compuestas de 450 g de suelo aproximadamente. Por último, se

homogenizaron, cuartearon y tamizaron en seco con un tamiz # 60; es decir, de 250 micras.

2.2.2.3 Diseño Experimental (Tratamientos) y Métodos de Análisis en el laboratorio

El diseño experimental con el que fueron tratados los suelos estudiados quedó conformado de la siguiente manera:

Tabla 5. Diseño experimental

Tratamientos Suelos	CONTROL			ROCA FOSFÓRICA			10 DÍAS DE INCUBACIÓN		
	C	EA	EC	C	EA	EC	C	EA	EC
ULTISOL									
ENTISOL									

C= Control; EA= Emulsión Aniónica; EC= Emulsión Catiónica

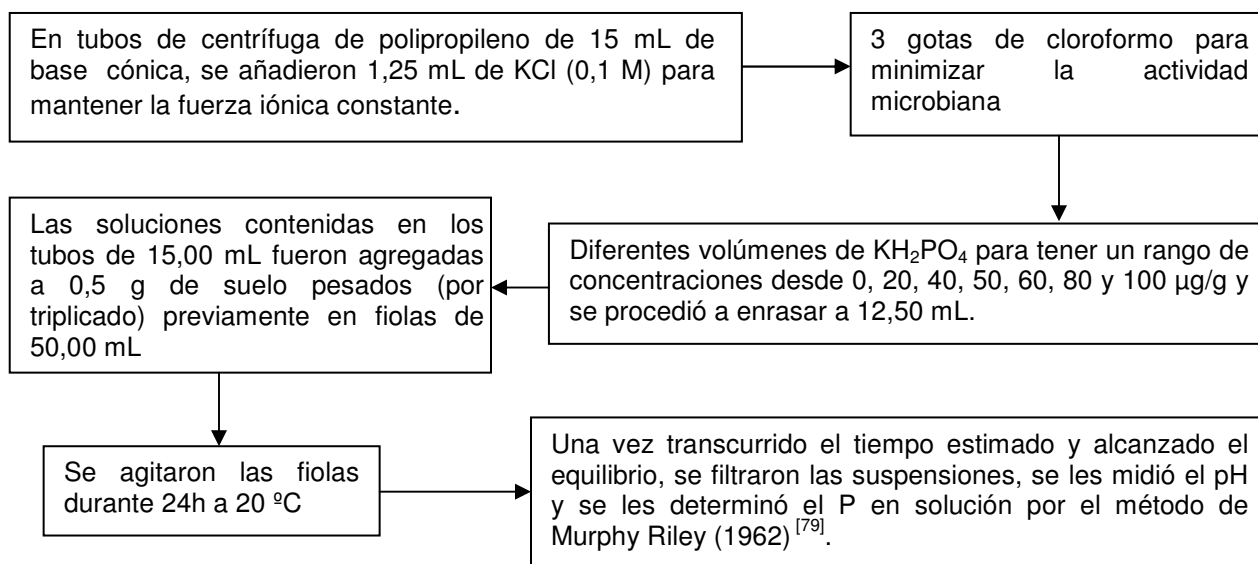
Determinación de pH en el suelo

El suelo se agitó con agua en una relación 1:5 (g/mL) por 5 min. Al final de la agitación se midió el pH de la suspensión (electrodo de vidrio) calibrando previamente el electrodo con solución buffer de 4 y 7, (ver Anexo 1).

Determinación de las Isotermas de adsorción de fósforo sin emulsión (control): Método empleado por López-Hernández y Col (1986) ^[63]

Se refiere al tratamiento de 0,5 g de suelo con cloruro de potasio (KCl), cloroformo y soluciones patrones de fosfato diácido de potasio (KH_2PO_4), a una

temperatura aproximada de 20°C y su posterior medición por medio del método colorimétrico de Murphy y Riley modificado (1962) ^[79]. Esta parte experimental se llevó a cabo de la siguiente forma:



Determinación de las Isotermas de adsorción de fósforo con emulsión aniónica y catiónica (introducción de fosfato antes, después y simultáneamente de la adsorción de emulsión)

1) Incorporación primero de P y luego de emulsión: Se procedió inicialmente como se hizo en la obtención de la isoterma control, transcurrida las 24h de agitación se le incorporó por separado a cada suspensión 0,01 mL de ambas emulsiones concentradas, lo que equivale a una dosis de 6,7 Mg/ha de emulsión catiónica y aniónica. Luego, se agitó nuevamente durante 24h a temperatura constante de aproximadamente 20°C, se filtró la solución y se determinó el fosfato en solución por el método de Murphy-Riley (Colorimetría).

2) Incorporación primero de emulsión y luego de P. Sin incubación: A los 0,50 g de suelo contenidos en las fiolas, se le agregaron 0,50 mL de agua destilada. Posteriormente se le añadió a cada suspensión por separado 0,01 mL de emulsión aniónica y catiónica y se agitó durante 24h a aproximadamente 20°C. Transcurrido el tiempo previsto, se le añadió la solución que contiene KCl, CHCl_3 y KH_2PO_4 , la cual fue preparada de la misma forma que la isoterma control pero con la variante que el volumen de enrase fue de 12,0 mL. Por último, se filtró la solución y se determinó el fosfato en solución por el método de Murphy-Riley.

3) Incorporación primero de emulsión con período de incubación de 10 días y luego de P: Se procedió igual que el párrafo anterior, pero con la variante que al aplicar las emulsiones se dejaron incubando durante 10 días a temperatura ambiente. Transcurrido el tiempo previsto se le agregó la solución que contiene KCl, CHCl_3 y KH_2PO_4 , se agitó durante 24h a temperatura constante de aproximadamente 20°C, se filtró y se determinó el fosfato en solución por el método de Murphy-Riley.

4) Incorporación simultánea de P y de emulsión: Se procedió igual que la isoterma en la que se incorporo primeramente la emulsión y luego el P, con la variante que el P se agrego en forma simultánea con la emulsión. Luego, se le agrego la solución que contiene KCl, CHCl_3 y KH_2PO_4 y se siguió el procedimiento de dicha isoterma.

Las isotermas de adsorción de fósforo se obtuvieron por el método descrito por López-Hernández y Burnham^[80].

Determinación del efecto dosis

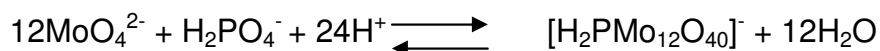
Bache y Williams^[81] sugirieron que un simple punto de la isoterma de adsorción

puede ser usado como índice de la adsorción de fosfato. Por lo que, se utilizará una solución de concentración inicial de KH_2PO_4 de 100 ppm y una relación suelo/solución de 0,5 g/12,5 mL, obteniendo a partir de allí una cantidad de fósforo adsorbida en (μg (P)/g suelo). Para ello se tomará este punto de la isoterma incluyendo la adición de emulsión catiónica y aniónica en dosis de: 0,00; 0,13; 0,25; 0,50; 1,00; 4,00 y 6,70 Mg/ha lo cual equivale a: 0; 0,0002; 0,0004; 0,0008; 0,0015; 0,0060 y 0,010 mL que son proporcionales a las dosis requeridas.

Después de equilibrar las soluciones y ser filtradas, se les determinó el pH de los extractos en un pH-metro marca Orión, modelo 720 A, (ver Anexo 1).

Determinación de P por el método colorimétrico: planteado por Murphy y Riley (1962)^[79]

Este método está basado en la reacción entre el ácido molíbdico y los iones fosfatos que forman el complejo fosfomolibdato de amonio el cual es reducido por el ácido ascórbico desarrollando un color azul cuantificable a 880 nm cuya intensidad es proporcional a la concentración de fósforo (P) en dicha solución.



El procedimiento fue el siguiente: Se tomó una alícuota de la solución problema, se le adicionaron 3 gotas de *p*-nitrofenol como indicador y se le ajustó el pH con NaOH y HCl 5N. Luego le fueron añadidos 4 mL del reactivo B preparado con Ácido Ascórbico, Molibdato de Amonio, Tartrato de Potasio y Ácido Sulfúrico y se enraso a 25 mL con agua destilada. Por último, se midió la absorbancia de P a 882 nm en un espectrofotómetro VARIAN de doble haz, (ver Anexo 2).

Coeficientes derivados de Langmuir

Los valores experimentales de adsorción que se obtuvieron se llevaron a su forma lineal mediante las ecuaciones de Langmuir.

Para ello se utilizó la siguiente versión de la ecuación de Langmuir:

$$X/m = (KbC_{eq}) / (1 + KC_{eq})$$

donde X/m describe la cantidad de sustancia adsorbida (P_{ads}) por unidad de adsorbente (suelo) expresada en $\mu g(P)/g$ suelo. C_{eq} es la concentración en el equilibrio (P) entre la materia adsorbida y el medio donde se realizará el proceso y será expresado en $(\mu g(P))/mL$ y tanto K como b son constantes empíricas.

La versión lineal de esta ecuación es la siguiente:

$$C_{eq}/X/m = 1/Kb + 1/b C_{eq}$$

donde se graficará $C_{eq}/X/m$ vs. C_{eq} y a partir de la ecuación de la recta se obtiene que $1/b$ (pendiente) permite establecer la máxima adsorción posible de fósforo en el suelo y $1/Kb$ (intercepto) que define el valor de la constante K que representa la energía de retención.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis físico- químico de los suelos

De acuerdo a López-Gutiérrez ^[82], los suelos en estudio son ligeramente ácidos, pobres en nutrientes y con baja capacidad de intercambio catiónico. La diferencia en el origen de estos suelos les confiere también diferencia en cuanto a la textura y por tanto en su capacidad fijadora de P. En la siguiente Tabla 6, se presenta la caracterización de los suelos en estudio.

Tabla 6. Caracterización general de los suelos. Tomado de López-Gutiérrez ^[82].

Orden de suelo	Ultisol	Entisol
pH	5,4a	5,4a
Arena (%)	73,2b	94,4a
Arcilla (%)	13,6a	4,0b
Limo (%)	13,2a	1,6b
Textura	franco-arenoso	arenoso
CIC	8,28a	2,42b
Fe (µg/g)	109,6a	25,4b
Al (meq/100g)	0,70b	0,85a

Valores seguidos de la misma letra no difieren significativamente (n=2; P<0,05).

3.2 Isotermas control de adsorción de P en ausencia de emulsión (IC)

Las Figuras 14, 15 y 16 muestran respectivamente las isotermas control de adsorción de P del Ultisol y el Entisol, y de los mismos suelos con la roca fosfórica incorporada. En dichas figuras se representan los µg de P adsorbidos por g de suelo (µgP/g suelo) en función de la concentración de P en el equilibrio (µgP/mL). En forma

general, se pudo observar en el Entisol, Ultisol y Entisol roca fosfórica, la tendencia a aumentar la cantidad de P adsorbido en la medida que se aumenta la concentración de P en el equilibrio, hasta que se alcanza la adsorción máxima de la superficie adsorbente. Mientras que, en el Ultisol dicha tendencia de aumento fue extremadamente más marcada que las antes mencionadas. Este hecho se debe, a que a medida que se aumenta la concentración de la fase adsorbible (fosfato), aumenta la superficie cubierta y por ende el número de sitios de adsorción ocupados, aumentando la interferencia entre los aniones cercanos y los aniones adsorbidos, permitiendo que el fosfato pueda ser adsorbido a diferentes niveles de energía ^[71].

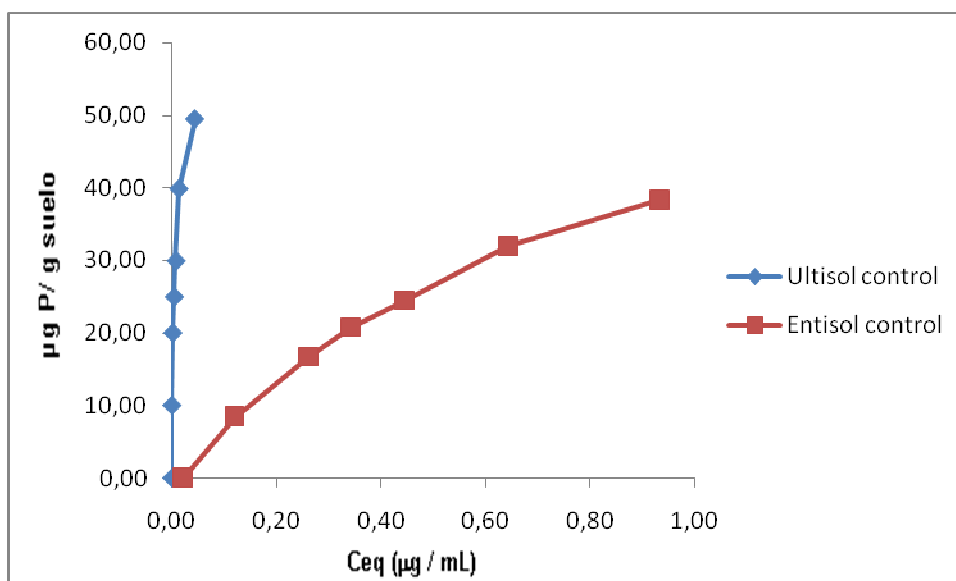


Figura 14. Isotermas control del Ultisol y el Entisol

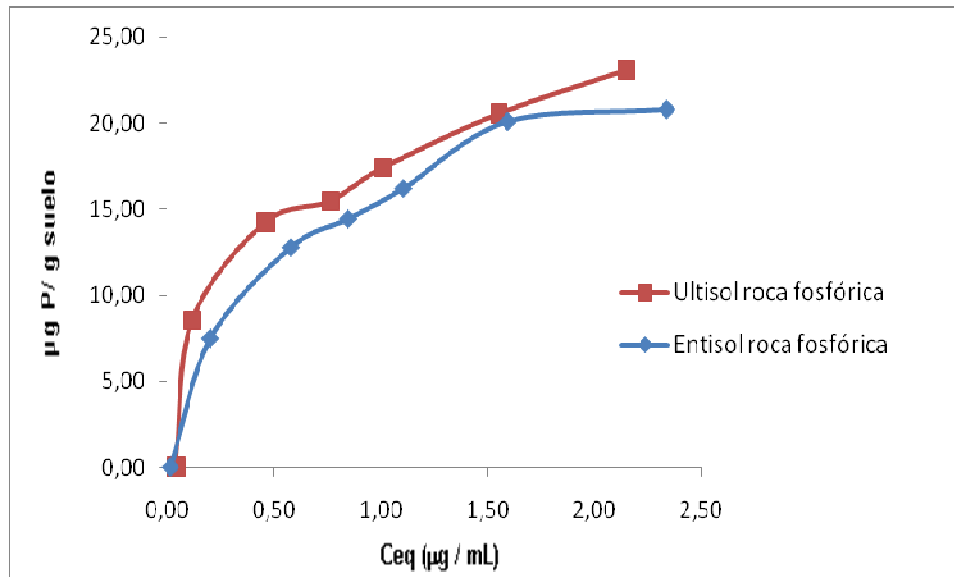


Figura 15. Isotermas control del Ultisol roca fosfórica y el Entisol roca fosfórica

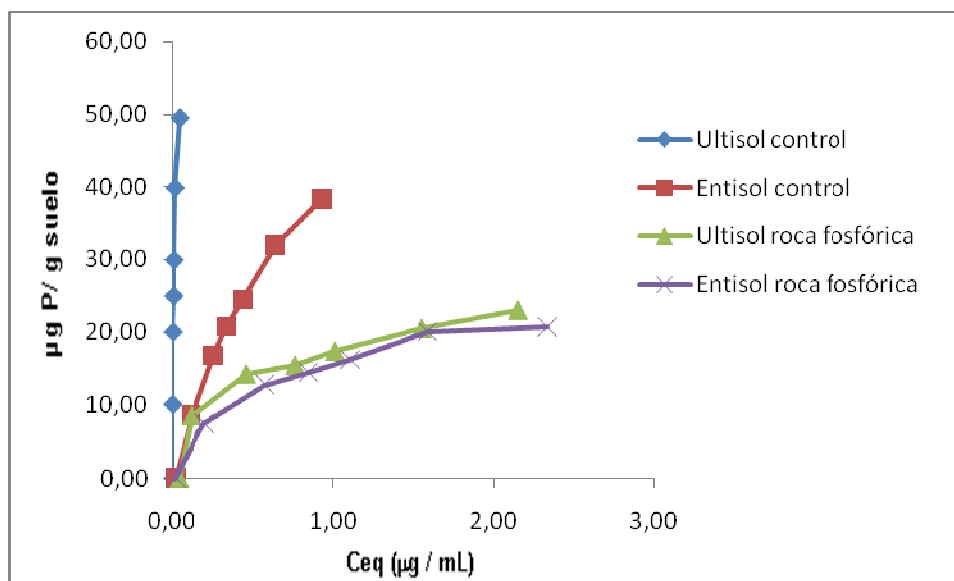


Figura 16. Isotermas control de los suelos de estudio

En la Figura 14, se pudo observar que el Ultisol presenta una adsorción de P muy superior a la obtenida en el Entisol. Este hecho se debe a que posee el Ultisol un mayor contenido de arcilla en conjunto con materiales adsorbentes (Fe y Al) que el Entisol; (ver Tabla 6), por lo que presenta una mayor superficie de adsorción y por ende un mayor número de sitios adsorbentes activos.

La Figura 15, evidencia como tras ser tratado con roca fosfórica ambos suelos tienen isotermas de adsorción de P muy similares, aunque es ligeramente superior la adsorción de P en el Ultisol. El cambio de la isoterma de adsorción se debe a la neutralización de los sitios activos de adsorción por la roca fosfórica, la cual es más evidente para el caso del Ultisol, (ver Figura 16). Esto coincide con Nuñez y col ^[83], Pérez y col ^[84] y López y col ^[85], los cuales evaluaron la solubilidad y eficiencia agronómica de algunas rocas fosfóricas naturales modificadas en cosechas sucesivas de diferentes cultivos, observando así un aumento de la disponibilidad de P en el suelo y un mayor rendimiento al pasar de una cosecha a otra, mientras que en los tratamientos de alta solubilidad la disponibilidad de P disminuye a medida que transcurre el tiempo.

En la siguiente Tabla 7 se presentan los valores de pH de las isotermas control.

Tabla 7. Valores de pH de las isotermas control

[KH ₂ PO ₄] µg/g	pH Ultisol control	pH Ultisol roca fosfórica	pH Entisol control	pH Entisol roca fosfórica
0	4,317	4,438	4,345	4,357
20	4,128	4,237	4,264	4,235
40	4,110	4,207	4,210	4,241
50	4,107	4,190	4,104	4,149
60	4,094	4,101	4,007	4,132
80	4,012	4,021	3,812	3,950
100	3,889	3,923	3,628	3,751

Al comparar los valores de pH iniciales de los suelos (Ultisol= 4.326; Ultisol roca fosfórica= 4.544; Entisol= 4.292 y Entisol roca fosfórica= 4.354) con los valores de la Tabla 7, se pudo observar que al aumentar la concentración de P añadido, ocurre una disminución consistente del pH y una mayor adsorción de P.

La presencia de los grupos (OH_2^+) en el suelo, le confiere a su superficie una mayor reactividad, dado que la carga (+) que se localiza sobre el átomo de oxígeno, ejerce un efecto de atracción de la densidad electrónica del enlace (Al-O) o (Fe-O) de naturaleza covalente, por el átomo de O, haciéndolo susceptible a romperse fácilmente, pudiendo ser desplazados los grupos (OH_2^+) al medio acuoso al ser intercambiados por otros iones presentes en la solución edáfica de los suelos, tales como el ión (H_2PO_4^-), el cual es la forma química más estable del fósforo presente en las soluciones edáficas a valores de pH entre 4 y 8, de acuerdo con López-Hernández [35].

Mott [86], propone el siguiente mecanismo de intercambio aniónico para iones (H_2PO_4^-) que son adsorbidos por la superficie del suelo, bajo condiciones de pH no muy lejanas al punto de carga cero (pH_{zpc}).

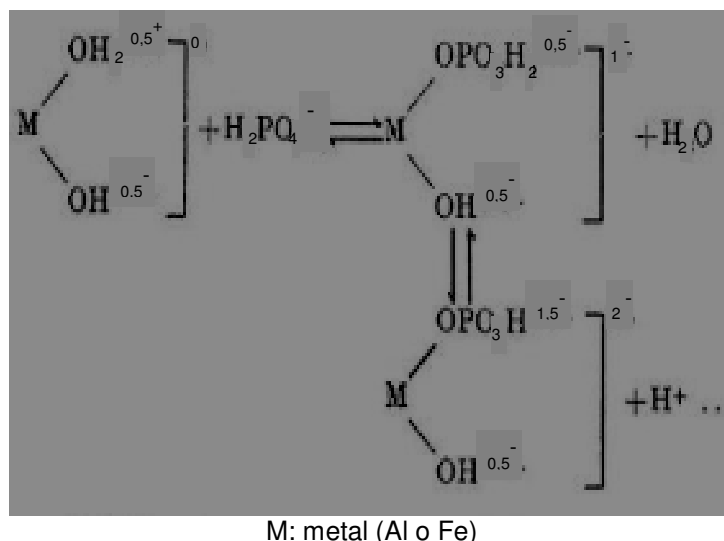


Figura 17. Mecanismo de intercambio aniónico del ión (H_2PO_4^-) propuesto por Mott [86]

En dicho mecanismo se puede observar como la superficie del suelo, bajo condiciones ácidas y en presencia de iones (H_2PO_4^-) es susceptible a experimentar reacciones de intercambio aniónico en la que los iones fosfato pueden remplazar fácilmente a los grupos (OH_2^+) que se encuentran en la superficie sólida, quedando quimiadsorbidos al compensar el déficit de electrones del átomo de Al o Fe con el excedente de electrones que posee el ión (H_2PO_4^-), y en consecuencia se forma una interacción covalente tan estable que fija dicho ión a la superficie del suelo de forma permanente, quedando el P fuertemente inmovilizado. Adicionalmente se puede validar, el incremento del pH de la solución acuosa como consecuencia del desplazamiento de los grupos (OH_2^+) presentes en la superficie del suelo por los grupos H_2PO_4^- .

Investigadores como Muljadi y col ^[87] estudiaron la adsorción de fosfatos en arcillas (caolinita y gibbsita) y óxidos metálicos, y plantearon que las isothermas de adsorción presentan una reacción con 3 regiones correspondientes a 3 sitios de diferentes niveles energéticos. Estableciendo así que en la región I y II (concentraciones bajas de P) la adsorción ocurre por intercambio con grupos OH^- sobre un átomo de dihidróxido de aluminio situado en el borde del cristal de la arcilla, y en la región III (concentraciones altas de P) la adsorción se da en las regiones cristalinas imperfectas de la superficie de las arcillas.

Por su parte Ryden y Syers ^[88] al estudiar la liberación de grupos OH^- como la variación de la carga neta superficial, proponen 2 mecanismos para la adsorción de fosfatos: 1. Intercambio de grupos OH^- y OH_2^+ que se encuentran unidos al átomo de hierro o aluminio, y 2. Interacción física (electrostática) entre el anión H_2PO_4^- y las cargas positivas que se encuentran en la superficie de las arcillas y óxidos metálicos. En forma general, se puede decir que a concentraciones bajas de P (Figura 14 y 15), la adsorción se da por intercambio de grupos OH^- y OH_2^+ en los bordes de los cristales de las arcillas, y a concentraciones altas de P la adsorción se da por la entrada del H_2PO_4^- a regiones imperfectas de las arcillas.

3.3 Isotermas de adsorción de P en presencia de las emulsiones asfálticas

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los experimentos en los que se incorporan las emulsiones asfálticas de rompimiento lento empleadas (catiónica y aniónica).

3.3.1 Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero el P y luego la emulsión

Las Figuras 18, 19, 20 y 21 muestran las isotermas de adsorción correspondientes a las situaciones en las que primero se incorporó el P al suelo y posteriormente se le adicionó la emulsión asfáltica (catiónica y aniónica).

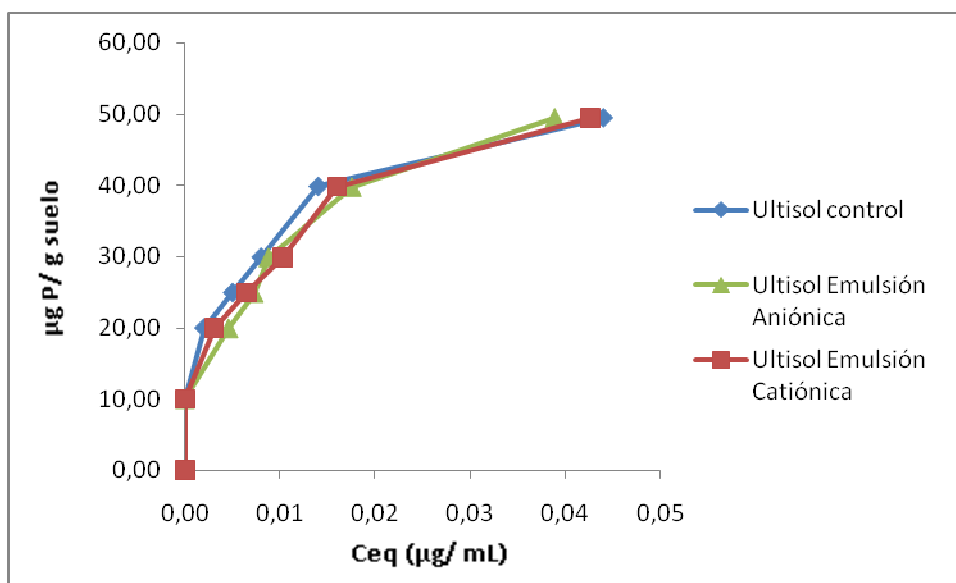


Figura 18. Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero el P y luego las emulsiones, en el Ultisol control

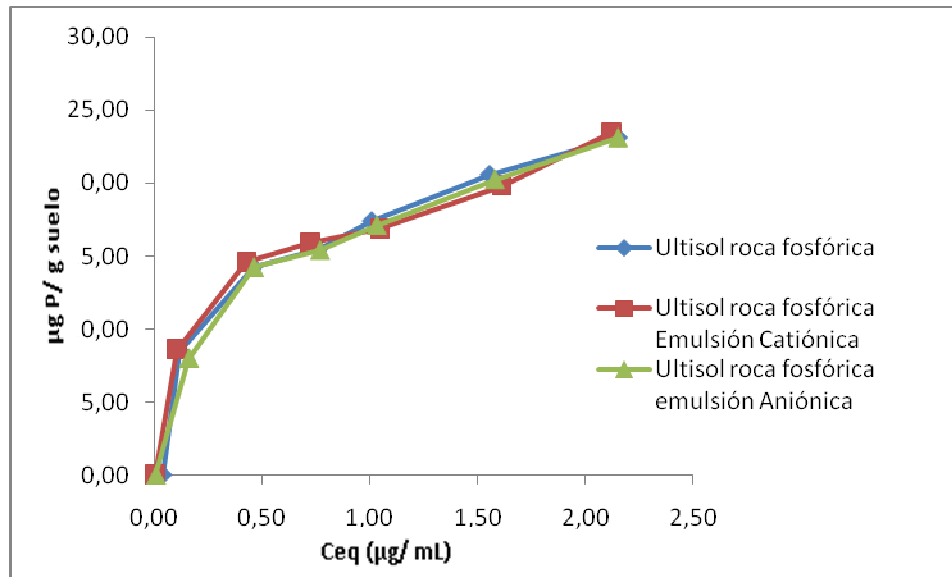


Figura 19. Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero el P y luego las emulsiones, en el Ultisol roca fosfórica

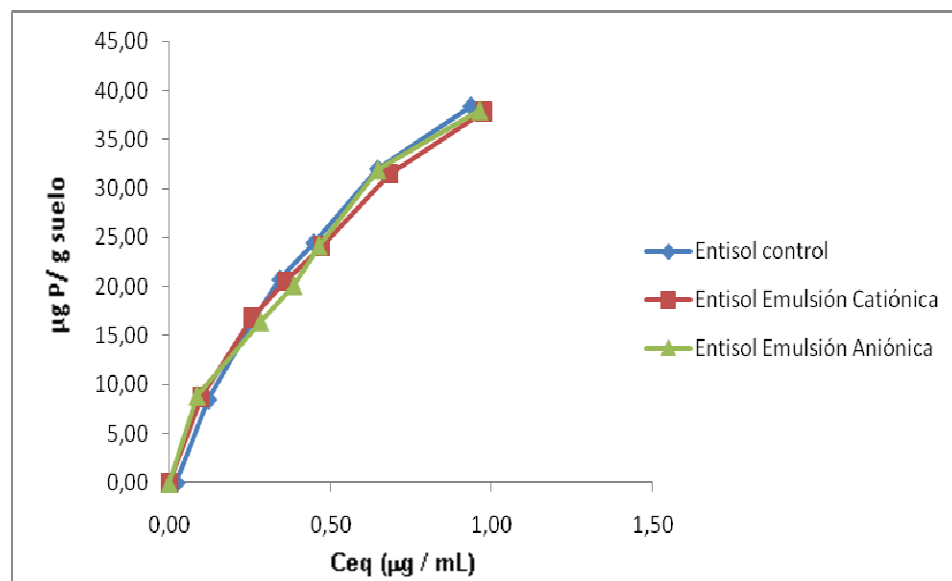


Figura 20. Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero el P y luego las emulsiones, en el Entisol control

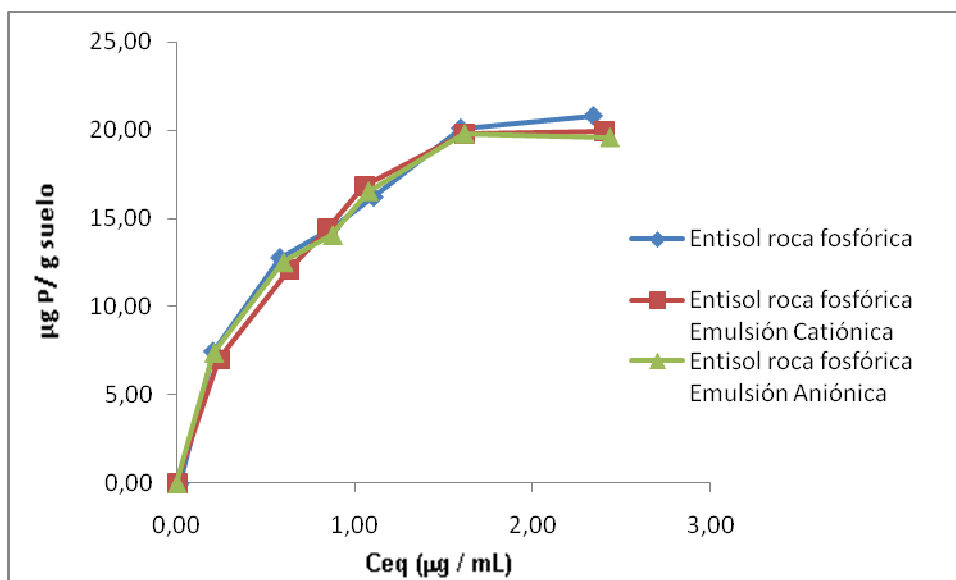


Figura 21. Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero el P y luego las emulsiones, en el Entisol roca fosfórica

En las Figuras 18, 19, 20 y 21 se pudo observar que las isotermas obtenidas tanto con la emulsión catiónica como la aniónica se solaparon con las isotermas controles. Esto es indicativo de que ninguna de las emulsiones asfálticas de rompimiento lento usadas, fueron capaces de ejercer un efecto de desorción de los iones fosfato una vez que estos han sido adsorbidos por la superficie del suelo bajo las condiciones experimentales de este trabajo. Este comportamiento es muy similar al observado por otros investigadores, tales como: López- Hernández y col ^[63], Hu y col ^[89] y Violante y col ^[90]. Esto se debe, a que por agregarse primero el fosfato antes que las emulsiones, y darse el tiempo suficiente para que se alcance el equilibrio de adsorción de P por parte del suelo, queda así fijado el fosfato en su estructura. Por lo que, al agregarse las emulsiones asfálticas no son capaces de competir con el P previamente adsorbido y de esta forma no ejercen ningún efecto sobre la adsorción de P.

En la siguiente Tabla 8 se presentan los valores de pH de las isotermas de adsorción en la que se incorpora primero el P y luego la emulsión.

Tabla 8. Valores de pH de las isotermas de adsorción en las que se incorpora primero el P y luego la emulsión

[KH ₂ PO ₄] µg/g	pH Ultisol			pH Ultisol roca fosfórica			pH Entisol			pH Entisol roca fosfórica		
	C	EC	EA	C	EC	EA	C	EC	EA	C	EC	EA
0	4,317	3,718	3,561	4,438	3,446	3,594	4,345	4,180	3,891	4,357	3,939	3,953
20	4,128	3,734	3,607	4,237	3,466	3,816	4,264	4,112	3,840	4,235	3,955	3,912
40	4,110	3,792	3,630	4,207	3,594	3,875	4,210	4,080	3,841	4,241	3,941	3,876
50	4,107	3,841	3,645	4,190	3,598	3,881	4,104	4,004	3,746	4,149	3,898	3,817
60	4,094	3,921	3,685	4,101	3,600	3,900	4,007	3,984	3,769	4,132	3,860	3,780
80	4,012	3,960	3,696	4,021	3,621	3,964	3,812	3,937	3,709	3,950	3,831	3,709
100	3,889	4,072	3,762	3,923	3,716	3,994	3,628	3,843	3,697	3,751	3,730	3,666

C= Control; EA= Emulsión Aniónica; EC= Emulsión Catiónica

Los valores de pH de la Tabla 8, muestran que en los casos donde se aplicaron las emulsiones asfálticas se produjo un aumento consistente del pH a la vez que se tiene una mayor adsorción de P, esto es en el caso del Ultisol pero en el Entisol ocurre lo contrario.

3.3.2 Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero las emulsiones y luego el P

Las Figuras 22, 23, 24 y 25 muestran las isotermas de adsorción correspondientes a las situaciones de competencia iónica en las que primero se incorporó la emulsión asfáltica (catiónica y aniónica) al suelo y posteriormente se le adicionó el P. En dichas figuras se pueden observar el efecto bloqueador de los sitios

activos que tuvo la emulsión sobre la adsorción de P, por lo que las isothermas obtenidas decayeron frente a la isoterma control.

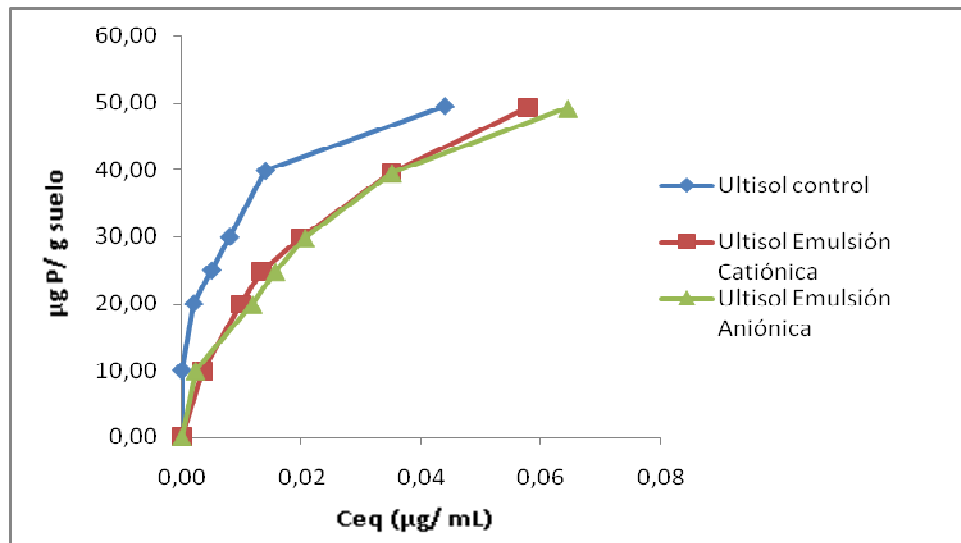


Figura 22. Isothermas de adsorción en las que se incorpora primero las emulsiones y luego el P, en el Ultisol control

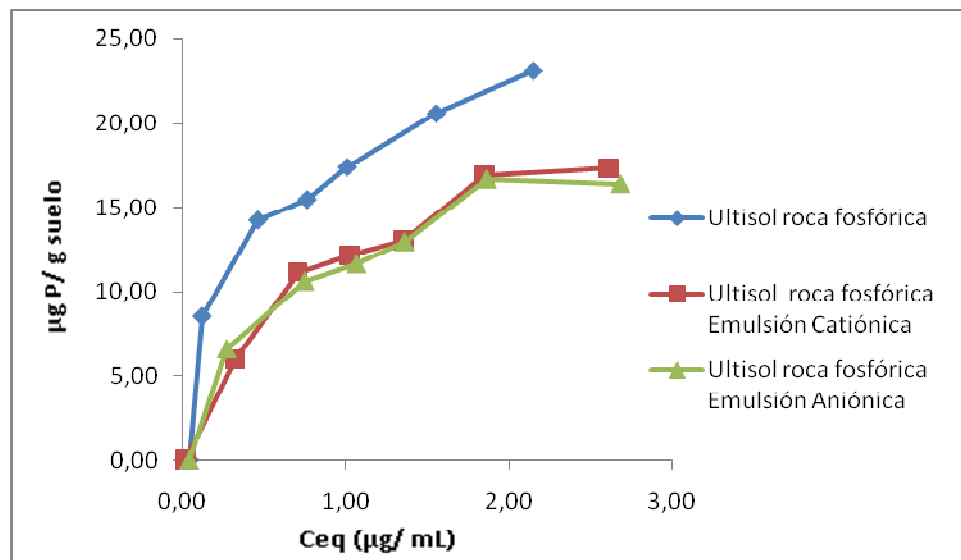


Figura 23. Isothermas de adsorción en las que se incorpora primero las emulsiones y luego el P, en el Ultisol roca fosfórica

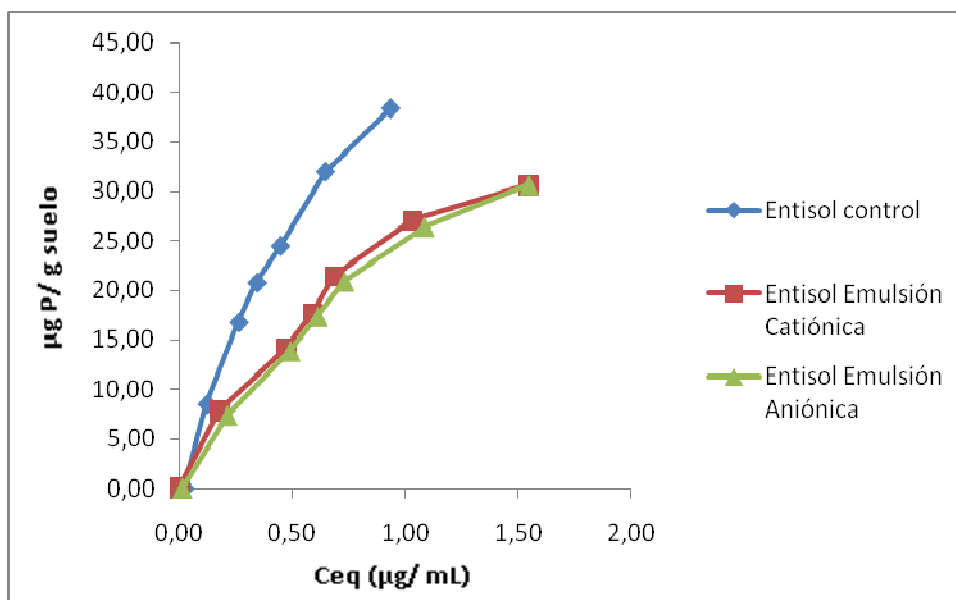


Figura 24. Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero las emulsiones y luego el P, en el Entisol control

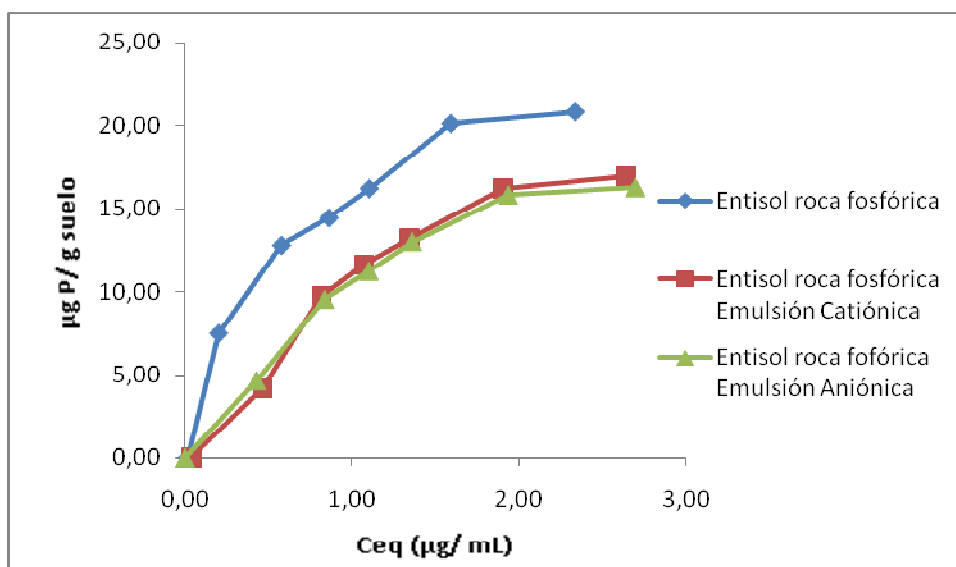


Figura 25. Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero las emulsiones y luego el P, en el Entisol roca fosfórica

En la siguiente Tabla 9 se presentan los valores de pH de las isothermas de adsorción en la que se incorpora primero las emulsiones y luego el P.

Tabla 9. Valores de pH de las isothermas de adsorción en las que se incorpora primero las emulsiones y luego el P

[KH ₂ PO ₄] µg/g	pH Ultisol			pH Ultisol roca fosfórica			pH Entisol			pH Entisol roca fosfórica		
	C	EC	EA	C	EC	EA	C	EC	EA	C	EC	EA
0	4,317	3,943	3,825	4,438	3,756	3,823	4,345	3,826	3,832	4,357	3,981	3,899
20	4,128	3,843	3,747	4,237	3,738	3,733	4,264	3,765	3,789	4,235	3,931	3,857
40	4,110	3,712	3,648	4,207	3,725	3,580	4,210	3,728	3,705	4,241	3,909	3,808
50	4,107	3,659	3,631	4,190	3,723	3,612	4,104	3,723	3,663	4,149	3,862	3,739
60	4,094	3,587	3,599	4,101	3,715	3,606	4,007	3,718	3,618	4,132	3,838	3,660
80	4,012	3,747	3,595	4,021	3,710	3,660	3,812	3,715	3,548	3,950	3,802	3,606
100	3,889	3,627	3,597	3,923	3,689	3,592	3,628	3,702	3,615	3,751	3,787	3,616

C= Control; EA= Emulsión Aniónica; EC= Emulsión Catiónica

3.3.3 Isothermas de adsorción en las que se incorpora primero las emulsiones con un período de incubación de 10 días y luego el P

Las Figuras 26, 27, 28 y 29 muestran las isothermas de adsorción correspondientes a las situaciones de competencia iónica en las que primero se incorporó la emulsión asfáltica (catiónica y aniónica) al suelo con un período de incubación de 10 días y posteriormente se le adicionó el P. En dichas figuras se pueden observar nuevamente el efecto bloqueador de los sitios activos que tuvo la emulsión sobre la adsorción de P, por lo que las isothermas obtenidas decayeron abruptamente frente a la isoterma control.

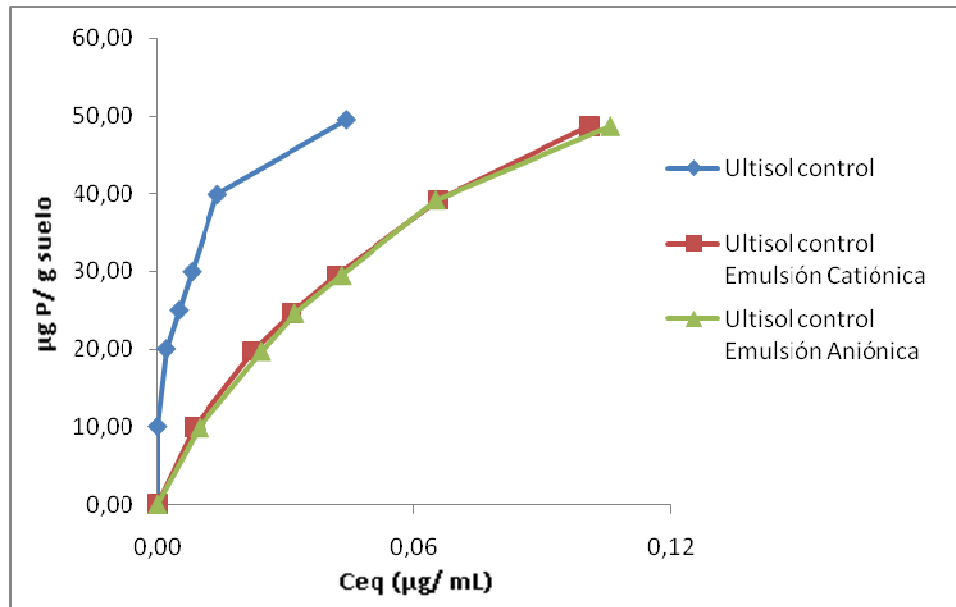


Figura 26. Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero las emulsiones con un período de incubación de 10 días y luego el P, en el Ultisol control

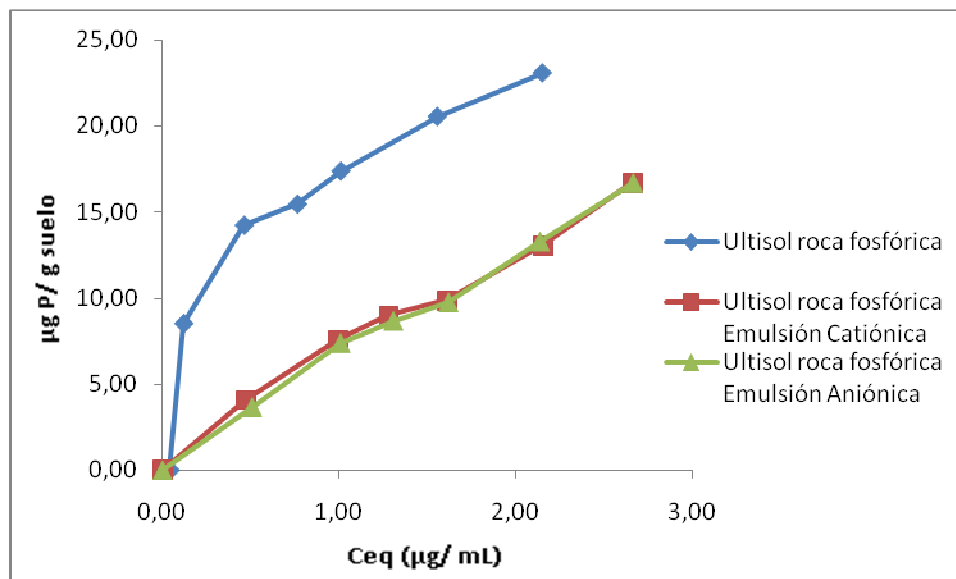


Figura 27. Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero las emulsiones con un período de incubación de 10 días y luego el P, en el Ultisol roca fosfórica

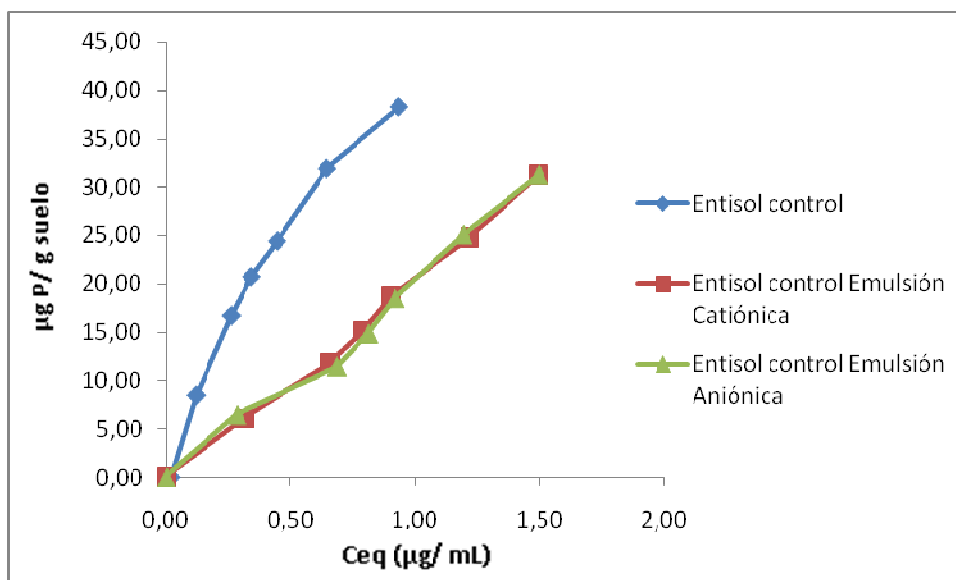


Figura 28. Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero las emulsiones con un período de incubación de 10 días y luego el P, en el Entisol control

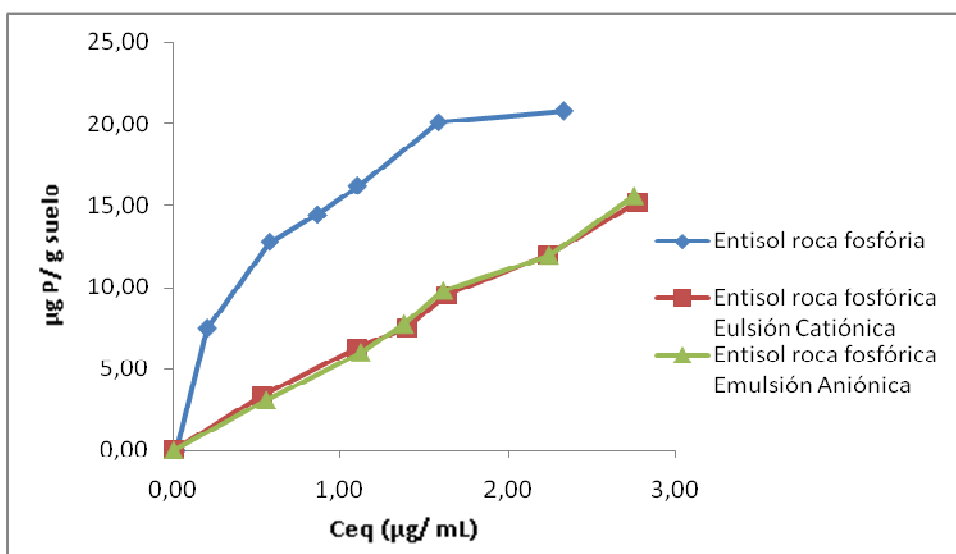


Figura 29. Isotermas de adsorción en las que se incorpora primero las emulsiones con un período de incubación de 10 días y luego el P, en el Entisol roca fosfórica

En la siguiente Tabla 10 se presentan los valores de pH de las isothermas de adsorción en las que se incorpora primero las emulsiones con un período de incubación de 10 días y luego el P.

Tabla 10. Valores de pH de las isothermas de adsorción en las que se incorpora primero las emulsiones con un período de incubación de 10 días y luego el P

[KH ₂ PO ₄] μg/g	pH Ultisol			pH Ultisol roca fosfórica			pH Entisol			pH Entisol roca fosfórica		
	C	EC	EA	C	EC	EA	C	EC	EA	C	EC	EA
0	4,317	3,744	4,104	4,438	3,969	4,059	4,345	3,935	4,129	4,357	4,072	4,153
20	4,128	3,805	3,821	4,237	4,022	4,070	4,264	3,917	4,087	4,235	4,064	4,093
40	4,110	3,753	3,854	4,207	3,975	3,999	4,210	3,899	4,038	4,241	4,040	4,075
50	4,107	3,691	3,746	4,190	3,898	3,960	4,104	3,939	4,012	4,149	3,963	4,074
60	4,094	3,584	3,918	4,101	3,893	3,949	4,007	3,726	4,086	4,132	3,893	4,036
80	4,012	3,877	3,863	4,021	3,864	4,060	3,812	3,640	3,916	3,950	3,806	4,024
100	3,889	3,644	3,897	3,923	3,796	3,666	3,628	3,616	3,892	3,751	3,816	4,037

C= Control; EA= Emulsión Aniónica; EC= Emulsión Catiónica

3.3.4 Isothermas de adsorción en las que se incorpora simultáneamente las emulsiones y el P

Las Figuras 30, 31, 32 y 33 muestran las isothermas de adsorción correspondientes a las situaciones de competencia iónica en las que se incorpora simultáneamente el P con las emulsiones asfálticas (catiónica y aniónica) al suelo. En dichas figuras se puede observar nuevamente el efecto bloqueador de los sitios activos que tuvo la emulsión sobre la adsorción de P, por lo que las isothermas obtenidas decayeron ligeramente frente a la isoterma control.

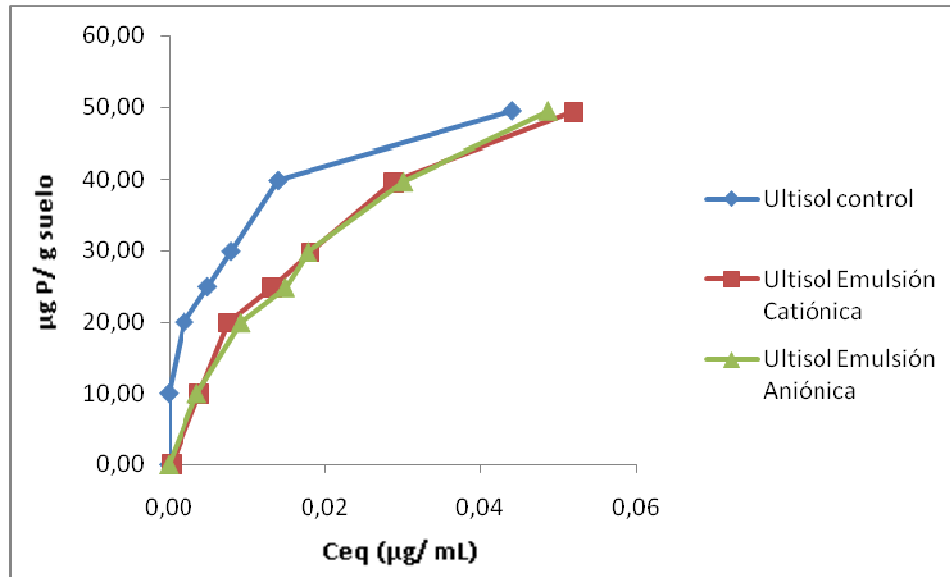


Figura 30. Isothermas de adsorción en las que se incorpora simultáneamente las emulsiones con el P, en el Ultisol control

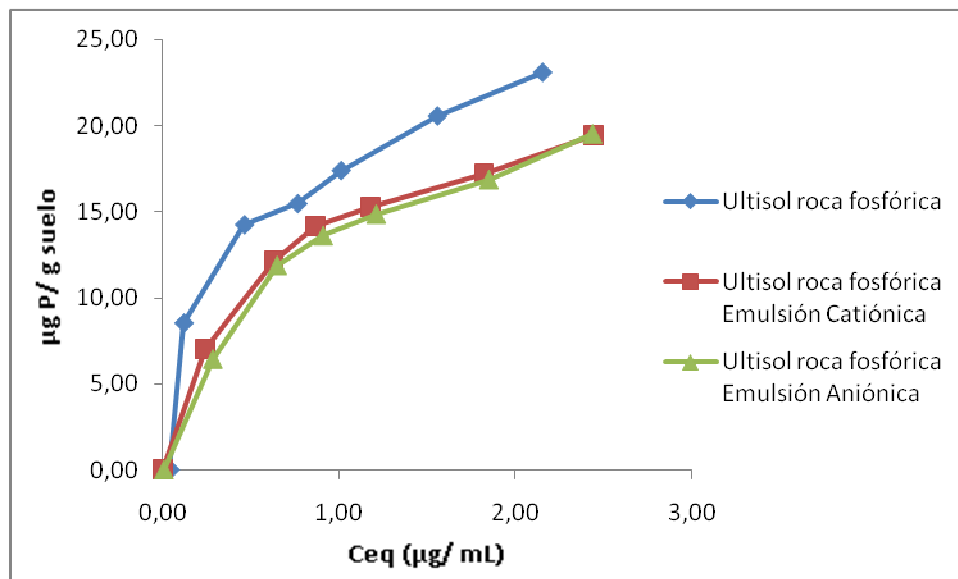


Figura 31. Isothermas de adsorción en las que se incorpora simultáneamente las emulsiones con el P, en el Ultisol roca fosfórica

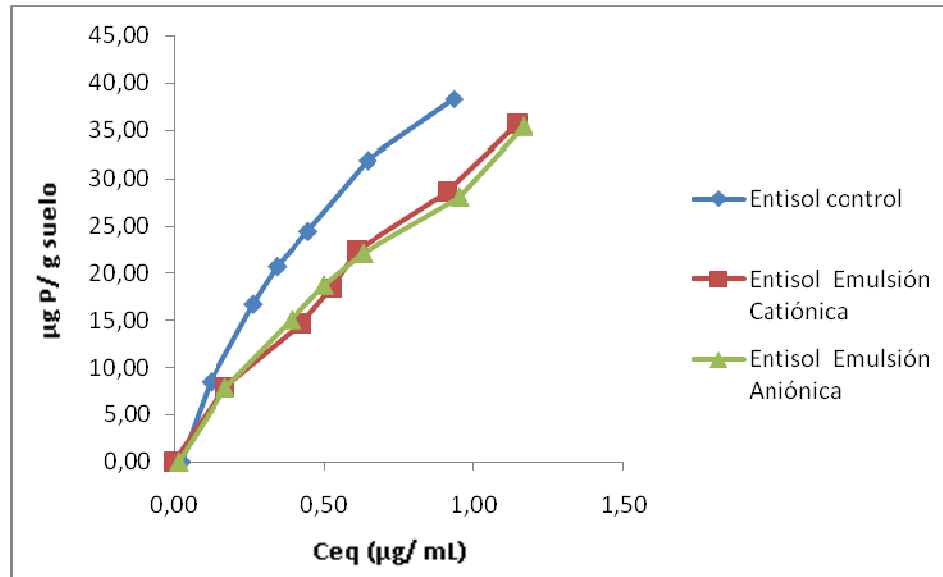


Figura 32. Isotermas de adsorción en las que se incorpora simultáneamente las emulsiones con el P, en el Entisol control

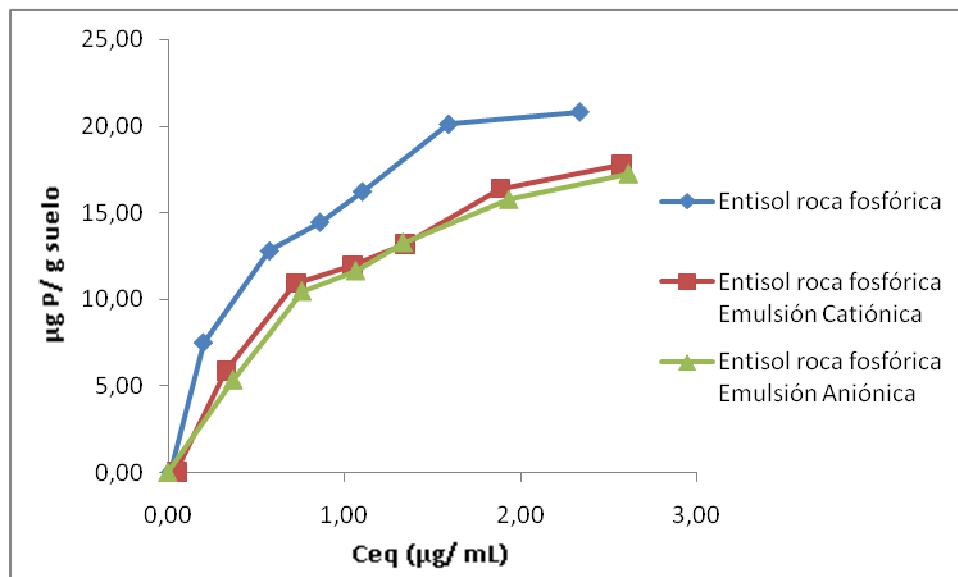


Figura 33. Isotermas de adsorción en las que se incorpora simultáneamente las emulsiones con el P, en el Entisol roca fosfórica

En la siguiente Tabla 11 se presentan los valores de pH de las isothermas de adsorción en la que se incorpora simultáneamente las emulsiones y el P.

Tabla 11. Valores de pH de las isothermas de adsorción en la que se incorpora simultáneamente las emulsiones y el P

[KH ₂ PO ₄] µg/g	pH Ultisol			pH Ultisol roca fosfórica			pH Entisol			pH Entisol roca fosfórica		
	C	EC	EA	C	EC	EA	C	EC	EA	C	EC	EA
0	4,317	3,790	4,030	4,438	3,978	4,041	4,345	3,981	4,079	4,357	3,953	3,939
20	4,128	3,814	3,999	4,237	3,921	3,984	4,264	3,947	3,957	4,235	3,912	3,955
40	4,110	3,742	3,957	4,207	3,906	3,942	4,210	3,876	3,808	4,241	3,876	3,941
50	4,107	3,721	4,019	4,190	3,828	3,839	4,104	3,759	3,825	4,149	3,817	3,898
60	4,094	3,750	3,887	4,101	3,826	3,925	4,007	3,700	3,772	4,132	3,780	3,860
80	4,012	3,579	4,053	4,021	3,733	3,786	3,812	3,673	3,705	3,950	3,727	3,831
100	3,889	3,659	4,105	3,923	3,710	3,721	3,628	3,583	3,624	3,751	3,666	3,730

C= Control; EA= Emulsión Aniónica; EC= Emulsión Catiónica

En las Figuras (22 hasta la 33), donde se incorporaron las emulsiones antes que el P, con un período de incubación de 10 días y simultáneamente con el P. Se pudo observar el efecto bloqueador de los sitios activos que ejercieron dichas emulsiones, haciendo que existiera mayor disponibilidad de P y en consecuencia las isothermas obtenidas decayeron frente a las isothermas control. Lo antes expuesto, nos indica que la interacción entre el suelo y las emulsiones asfálticas es más fuerte que la del suelo con el ión fosfato, solo en los casos donde se aplica la emulsión antes que el P. Estos resultados coincidieron con los obtenidos por Hingston y col ^[91]; Flores ^[92]; Siegert ^[93], Rodriguez ^[94] y López- Hernández y col ^[63] los cuales estudiaron los efectos de competencia iónica de aniones orgánicos sobre la adsorción de P y comprobaron que la aplicación de dichos aniones modificaba drásticamente la isoterma resultante.

Como se ha podido observar en las Figuras antes mencionadas, las emulsiones asfálticas tanto catiónica como aniónica presentaron un comportamiento similar en cuanto a su efecto sobre la adsorción de P en los suelos estudiados. Para tratar de entender un poco estos hechos experimentales, es necesario reseñar las interpretaciones hechas con anterioridad acerca del rompimiento de una emulsión.

Rodríguez y col ^[54], consideraron que el fenómeno de rompimiento o ruptura de la emulsión ocurría cuando las partículas de asfaltos que inicialmente se encuentran formando miscelas asfalto-surfactantes y que son estabilizadas por las repulsiones electrostáticas que se producen entre ellas, al entrar en contacto con una superficie sólida, tienden a quedar adheridas a la misma, perdiendo su forma esférica y formando agregados de asfalto a la vez que se desprenden los surfactantes, los cuales tienden a ser adsorbidos por la superficie sólida. Esta situación nos permite explicar, como las emulsiones asfálticas son capaces de ejercer un efecto bloqueador de los sitios de adsorción de P de la superficie de los suelos, dado que, las moléculas de asfalto al quedar adheridas a la superficie del suelo, forma una especie de película que sirve de barrera e impide que los iones (H_2PO_4^-) pueda interactuar con el suelo, tal como se puede apreciar en la Figura 34.

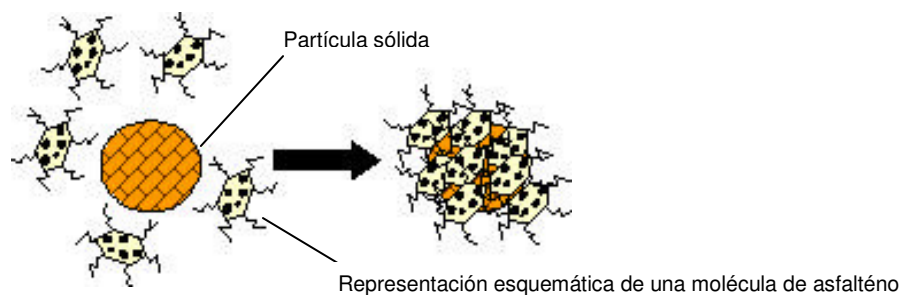


Figura 34. Esquema del mecanismo de nucleación de asfaltenos en presencia de partículas sólidas ^[95].

Lo antes expuesto, nos hace pensar que el fenómeno de rompimiento o ruptura de la emulsión ocurre debido a la carga eléctrica que tiene la superficie del suelo, la cual es capaz de neutralizar la carga de las partículas de asfalto en la emulsión, permitiendo que se acerquen unas a otras para formar agregados de gran tamaño; estos agregados son los que se depositan sobre la superficie del suelo formando una capa asfáltica, al mismo tiempo en el que el emulsificante liberado es adsorbido por la superficie.

Recientemente, Barreto ^[96] al estudiar el efecto de las emulsiones asfálticas (catiónica y aniónica) sobre la adsorción de P en una Caolinita, propone que la adsorción de los asfáltenos se lleva a cabo a través procesos de quimi y fisiadsorción. Donde, los grupos (-COOH) presente en estas estructuras moleculares, por su condición ácida, pueden interactuar químicamente con los grupos (-OH) de la Caolinita, desprotonándolos y transformándolos en grupos básicos del tipo carboxilato (-COO^-), capaces de bloquear los sitios de adsorción de P en la Caolinita. Señala además, que el efecto químico se ve limitado por el impedimento estérico de estas macroestructuras de asfáltenos, dado a la complejidad de dichas estructuras, la mayor parte de los grupos (-COOH) presentes en la misma, podrían no llegar a interactuar adecuadamente con la superficie del mineral.

Partiendo de la idea de que las moléculas de asfalto por ser muy grandes y presentar un mayor impedimento estérico, no pueden competir como fracción iónica con el fosfato por los sitios de adsorción de P y ejercer de esta forma un efecto bloqueador sobre la superficie de los suelos. Se pudiera pensar, que los surfactantes que se liberan de las miscelas asfalto-surfactante, por presentar estructuras más sencillas y de menor volumen, sean muy probablemente los que ejerzan un efecto bloqueador de un modo eficiente, pudiendo desplazar a los grupos (OH_2^+) presentes en la superficie del suelo. Estos surfactantes son quimiadsorbidos por el suelo, orientando su grupo polar hacia la

superficie adsorbente, el cual puede interactuar químicamente con la misma por medio del establecimiento de enlace covalentes o interacciones electrostáticas, mientras que la parte hidrofóbica permanece orientada hacia la parte contraria, lo cual le permite a la superficie del suelo adquirir un carácter parcialmente hidrofóbico, en el cual los asfáltenos pueden ser fisiadsorbidos de un modo eficiente aún en presencia de humedad ^[54], lo cual coincide con el modelo de adsorción de asfalto en superficie húmeda propuesto por Loeber y col ^[97], estableciéndose de este modo una barrera física de macroagregados de asfalto que impide la interacción de los iones de fosfato con el suelo, (ver Figura 34).

Al correlacionar los resultados obtenidos con los de López-Hernández y col ^[63], se pudo constatar el papel protagónico que desempeñan los surfactantes aportados por las emulsiones asfálticas en la disminución de la adsorción de P por la superficie del suelo, bien sea por el efecto de competitividad que desempeña frente a los iones fosfato o también por el rol fundamental que juegan dichas moléculas en el establecimiento de películas de macroagregados de asfalto de relativa estabilidad que se establecen en torno a las partículas del suelo. Cabe destacar que al comparar los iones orgánicos empleados por dichos investigadores con las moléculas de surfactantes, en cuanto a grupos funcionales y volumen molecular, son similares.

Basados en estas propiedades y el mecanismo propuesto por Mott ^[86]; (Figura 16), a continuación se plantean los posibles mecanismos de intercambio iónico que permiten explicar el hecho de que ambos tipos de emulsiones asfálticas, catiónica y aniónica ejerzan efectos similares en la disminución de la adsorción de P por el suelo, tal como se pudo observar en los resultados experimentales obtenidos, (ver Figuras 35, 36, 37 y 38).

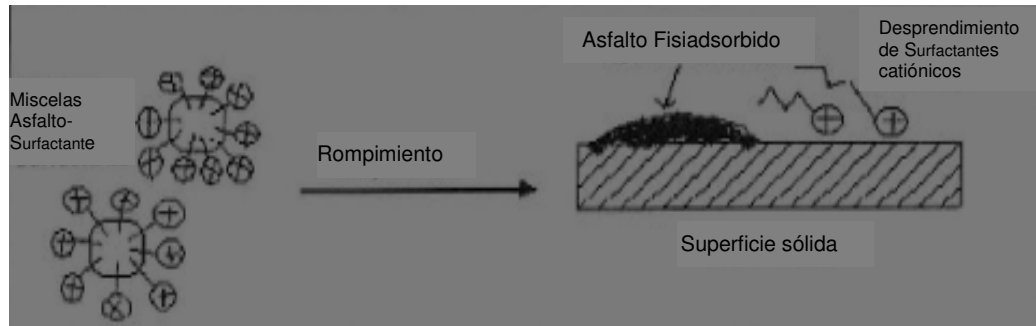


Figura 35. Simulación del rompimiento de una emulsión asfáltica catiónica

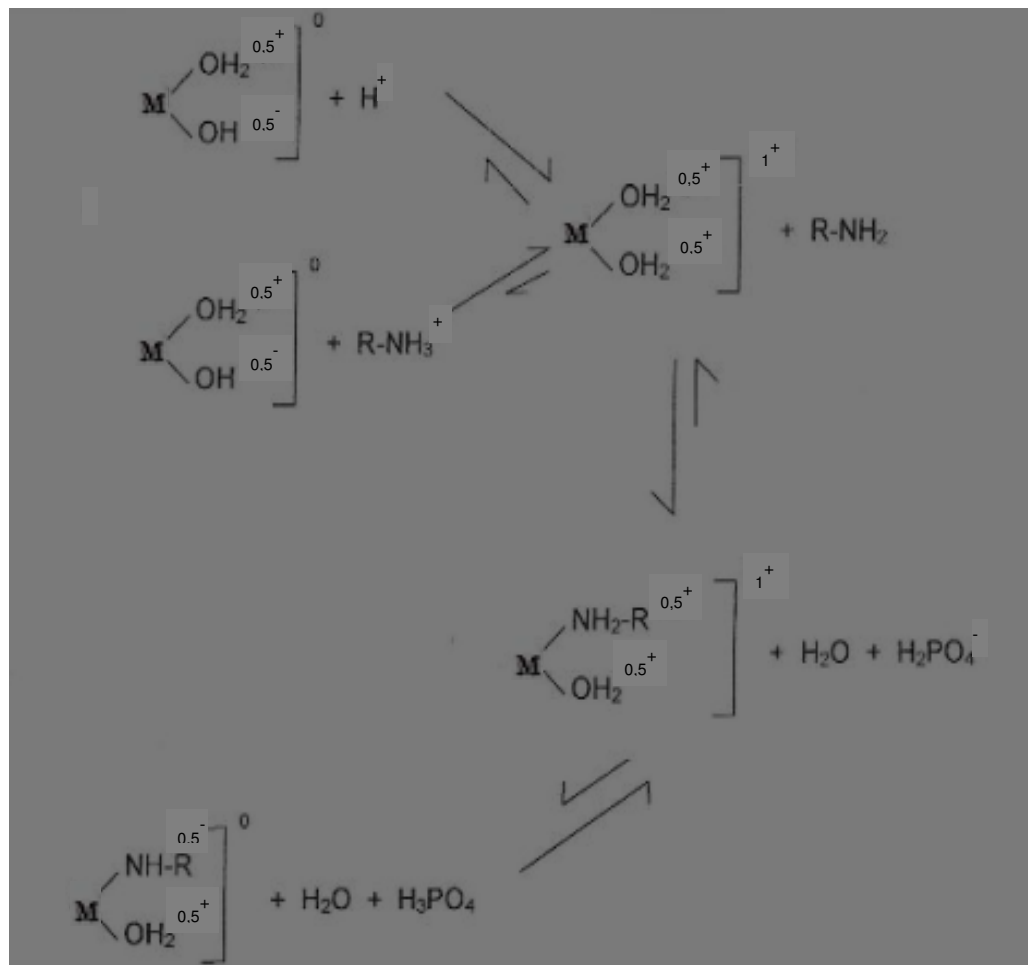


Figura 36. Esquema hipotético propuesto para la interacción suelo- emulsión catiónica

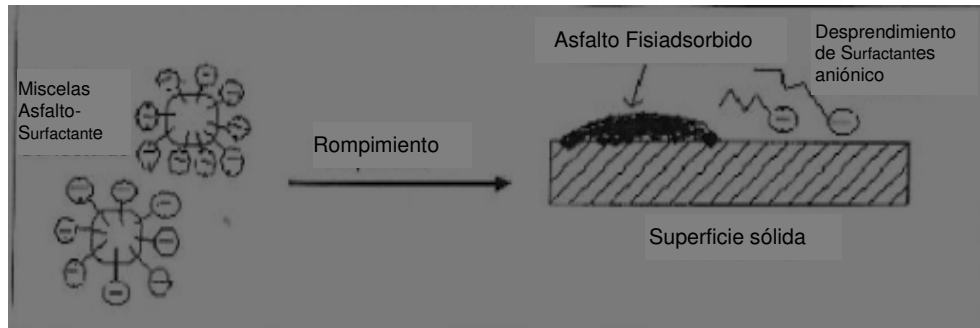
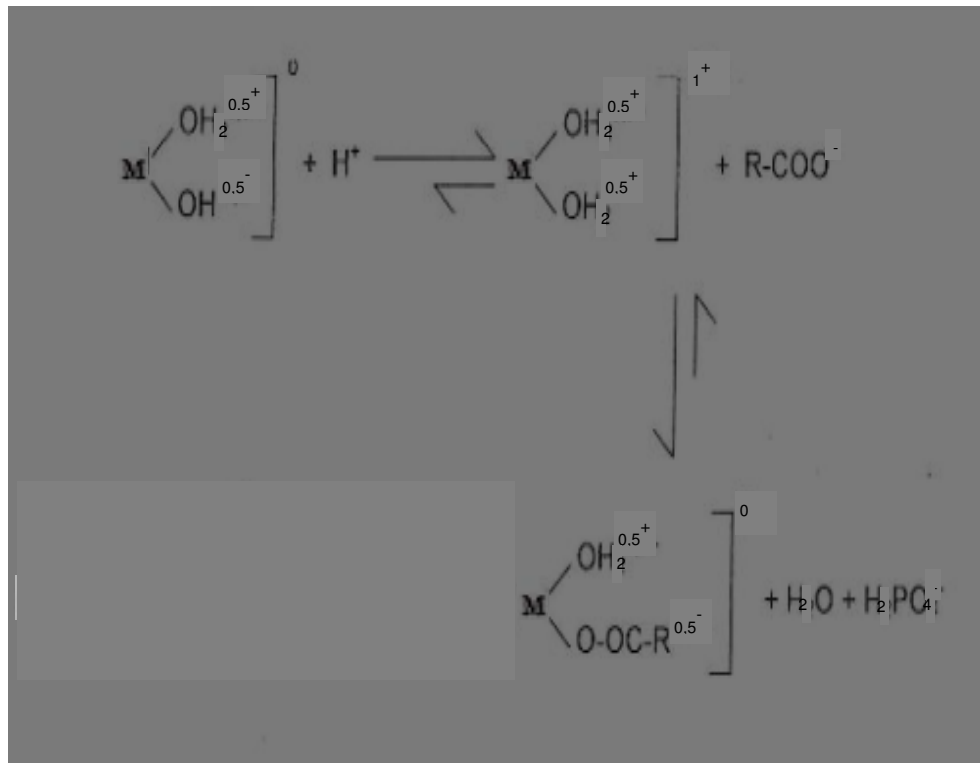


Figura 37. Simulación del rompimiento de una emulsión asfáltica aniónica



M: metal (Al o Fe)

Figura 38. Esquema hipotético propuesto para la interacción suelo- emulsión aniónica

En las Figuras 35 y 37, se puede observar como durante la ruptura de una emulsión asfáltica, se desprende una cierta cantidad de surfactantes de las miscelas

asfalto-surfactante, los cuales tienden a interactuar con la superficie adsorbente.

Comercialmente, los surfactantes catiónicos presentan una estructura molecular del tipo (R-NH_3^+) y de acuerdo a sus propiedades ácido-base, poseen la cualidad de comportarse como una especie ácida capaz de aportar protones en un medio acuoso con relativa facilidad. Por lo tanto, es de esperarse que este tipo de surfactante, en presencia de una superficie que no ejerza repulsiones electrostáticas significativas, pueda eventualmente interactuar químicamente con la misma. De este modo, estos surfactantes, pueden desprotonarse relativamente fácil al entrar en contacto con los grupos ($-\text{OH}$) presentes en la superficie del suelo, fomentando aún más la protonación de dichos grupos, no solo por el carácter ácido del sistema, si no por ser el surfactante una fuente directa de protones. Al interactuar dicho surfactante con los grupos ($-\text{OH}$) de la superficie metálica del suelo, se generan los grupos ($-\text{OH}_2^+$), los cuales pueden ser fácilmente desplazados por la base conjugada del surfactante catiónico (R-NH_2), la cual actuaría como base de Lewis, ejerciendo de este modo un efecto bloqueador de los sitios activos de adsorción de P presentes en la superficie del suelo, en nuestro caso se trata de una superficie metálica (Al o Fe) deficiente de densidad electrónica, la cual puede ser satisfecha por los pares electrónicos de carácter básico que presentan los grupos ($-\text{NH}_2$), (ver Figura 36).

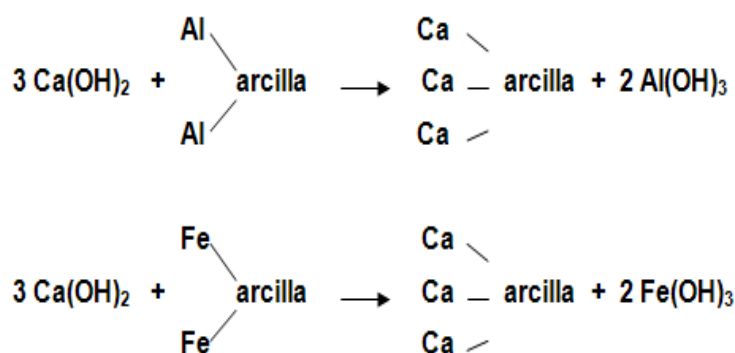
En el caso de las emulsiones aniónicas, a diferencia de las catiónicas, aportan al sistema sólido-líquido, surfactantes aniónicos, los cuales presentan una estructura molecular del tipo (R-COO^-). Estos surfactantes, cuyo grupo funcional es el carboxilato, son uno de lo más usados en la elaboración comercial de emulsiones de este tipo, ya que poseen la cualidad de comportarse como una base Lewis, capaz de aportar densidad electrónica frente a especies químicas deficientes en ella. Por lo que, es muy factible que este tipo de surfactantes, en presencia de una superficie que no ejerza repulsiones electrostáticas significativas, pueda eventualmente interactuar

químicamente con la misma, bloqueando directamente los sitios de adsorción de P presentes en el suelo. Este bloqueo se lleva a cabo, a través de la protonación de los grupos (-OH) presentes en los suelos por los protones del medio acuoso, lo cual hace que se conviertan en grupos (-OH₂⁺) y en consecuencia, debido a la carga (+) que se localiza sobre el oxígeno, se debilita el enlace Al-O o Fe-O, por lo que dichos grupos (-OH₂⁺), tienden a ser fácilmente desplazados de la estructura cristalina del suelo por los ligandos (R-COO⁻), pudiendo posteriormente formar interacciones químicas estables con el Al o el Fe por medio de enlaces covalentes, quedando de este modo quimiadsorbido, (ver Figura 38).

En los casos, donde se aplicaron las emulsiones con un período de incubación de 10 días a temperatura ambiente, se pudo observar que los surfactantes actuaron más eficazmente sobre los sitios activos de adsorción por lo que las isothermas obtenidas decayeron drásticamente frente a las isothermas control. Este hecho, pudiese estar relacionado con la temperatura y el tiempo, dado que ambos factores influyen en el rompimiento de las emulsiones asfálticas. De acuerdo a lo descrito en el Manual Básico de Emulsiones Asfálticas-Serie N° 19 ^[98], a temperaturas bajas, las micelas asfalto-surfactantes, muestran una mayor estabilidad, siendo menos propensas a romperse, por lo que las emulsiones asfálticas, a temperaturas por debajo de 25 °C, podrían estar ejerciendo un efecto limitado sobre la superficie adsorbente. Por otra parte, el tiempo que se le da a una emulsión para romper, también influye considerablemente en la eficacia de rompimiento de las mismas, tal y como se pudo observar en los resultados obtenidos en este trabajo, teniéndose un efecto más marcado, cuando el período de incubación es mayor, (ver Apéndice 21, 22, 23 y 24)

Mientras que en los casos donde los suelos que fueron inicialmente fertilizados con la roca fosfórica y luego, se le incorporaron las emulsiones con un período de incubación de 10 días, se obtuvieron los mejores resultados; es decir, se obtuvo una

menor cantidad de P adsorbido y en consecuencia las isothermas decayeron abruptamente frente a las isothermas control. Esto se debió; muy posiblemente, a que por estar la roca fosfórica conformada por el mineral apatito ($\text{Ca}_5(\text{F},\text{Cl},\text{OH})(\text{PO}_4)_3$). En un principio, el calcio presente en dicho mineral, pudo reaccionar con los suelos en estudio, y ocurrió así un intercambio catiónico entre el calcio y las formas activas de hierro y aluminio (asociadas a las arcillas) presentes a dicho pH ácido, esto puede ser representado de la siguiente forma ^[35].



Dado a que en condiciones ácidas, el hierro y el aluminio retienen el fosfato y forman compuestos insolubles. Cuando el calcio presente en la roca fosfórica se intercambia con los cationes Al^{+3} y Fe^{+3} presentes en las arcillas, ya no quedan libres para retener al fosfato, por lo que queda mayor cantidad de P disponible.

Por otra parte, la variación de pH observado puede ser explicado a través del pH del punto de carga cero (pH_0). Dado que, los valores de pH iniciales (Ultisol= 4.326; Ultisol roca fosfórica= 4.544; Entisol= 4.292 y Entisol roca fosfórica= 4.354) se encontraron muy cercanos al valor de pH_0 de la materia orgánica del suelo ($\text{pH}_0 = 3,0$) presente en la Tabla 2. Es de esperarse que bajo estas condiciones de pH, la superficie del suelo presente una carga neta superficial alrededor de cero, en consecuencia, es muy probable que no se establezcan repulsiones electrostáticas significativas entre la

superficie sólida y los iones surfactantes tanto aniónicos como catiónicos, pueden acercarse lo suficiente al suelo como para poder interactuar con la superficie del mismo. En base a esto, se puede decir, que en la ruptura de las emulsiones como lo mencionó Rodríguez y col ^[54], se desprende una cierta cantidad de surfactante de las partículas de emulsión (miscelas asfalto-surfactante), los cuales tienden a interactuar con la superficie adsorbente.

En forma general, se puede decir, que los análisis realizados, mostraron que efectivamente en las isothermas donde se emplearon las emulsiones asfálticas de rompimiento lento (catiónica y aniónica), evidenciaron una disminución en la adsorción de P por parte del suelo, con excepción de las isothermas en las que primero se le agrego el P y luego las emulsiones. Por último, se observó que el pH en los suelos donde se aplicó la emulsión catiónica se hizo ligeramente más ácido que el pH donde se aplicó la emulsión aniónica, esto se debió posiblemente a que los surfactantes catiónicos, por ser una fuente directa de protones, aumentaron la concentración de protones del medio observándose este efecto.

3.4 Coeficientes derivados de Langmuir

Los estudios de adsorción de P relacionan la concentración de P en el equilibrio contra el P adsorbido ajustando los datos de adsorción a una isoterma previamente escogida, las cuales pueden representarse matemáticamente a través de ecuaciones fisicoquímicas que se utilizan en sistemas más homogéneos ^[99]. A continuación se presentan los resultados de las isothermas de Langmuir ajustada a su forma lineal (ecuación (5)), se usó este modelo ya que es el que mejor se ajusta a las condiciones de trabajo (concentraciones bajas que van desde 0 hasta 100 $\mu\text{g/g}$), donde se garantiza la formación de la monocapa. En la siguientes Tabla 12 y 13, se presentan los valores del coeficiente de adsorción máxima (X_m), constante relacionada con la energía de enlace (K), ecuación de la recta y R^2 .

Tabla 12. Valores de la emulsión catiónica relacionados a la ecuación lineal de Langmuir y de la recta

Suelo	Tipo de Isotherma	Ecuación de la recta	R ²	X _m (µg P/g suelo)	K(mL / µg P)
Ultisol	Control	0,001x + 5E-6	0,934	1000	200
	Incorporación primeramente de P y luego de emulsión	0,001x + 5E-6	0,920	1000	200
	Incorporación primeramente de emulsión y luego de P	0,001x + 1E-5	0,913	833	120
	Incorporación primeramente de emulsión con período de incubación de 10 días y luego de P	0,002x + 2E-5	0,955	500	100
	Incorporación simultánea de P y emulsión	0,001x + 1E-5	0,974	769	130
Ultisol roca fosfórica	Control	0,021x + 0,004	0,957	48	5
	Incorporación primeramente de P y luego de emulsión	0,021x + 0,004	0,958	48	5
	Incorporación primeramente de emulsión y luego de P	0,025x + 0,011	0,919	40	4
	Incorporación primeramente de emulsión con período de incubación de 10 días y luego de P	0,025x + 0,029	0,923	32	2
	Incorporación simultánea de P y emulsión	0,024x + 0,008	0,960	42	3
Entisol	Control	0,010x + 0,002	0,861	100	6
	Incorporación primeramente de P y luego de emulsión	0,011x + 0,002	0,901	91	6
	Incorporación primeramente de emulsión y luego de P	0,012x + 0,004	0,849	83	4
	Incorporación primeramente de emulsión con período de incubación de 10 días y luego de P	0,013x + 0,003	0,890	77	3
	Incorporación simultánea de P y emulsión	0,011x + 0,002	0,869	91	4
Entisol roca fosfórica	Control	0,023x + 0,007	0,806	43	4
	Incorporación primeramente de P y luego de emulsión	0,024x + 0,007	0,839	42	4
	Incorporación primeramente de emulsión y luego de P	0,034x + 0,010	0,810	29	3
	Incorporación primeramente de emulsión con período de incubación de 10 días y luego de P	0,060x + 0,020	0,817	17	1
	Incorporación simultánea de P y emulsión	0,025x + 0,012	0,961	40	2

Tabla 13. Valores de la emulsión aniónica relacionados a la ecuación lineal de Langmuir y de la recta

Suelo	Tipo de Isotherma	Ecuación de la recta	R ²	X _m (µg P / g suelo)	K (mL / µg P)
Ultisol	Control	0,001x + 5E-6	0,934	1000	200
	Incorporación primeramente de P y luego de emulsión	0,001x + 5E-6	0,937	1000	200
	Incorporación primeramente de emulsión y luego de P	0,001x + 1E-5	0,986	769	130
	Incorporación primeramente de emulsión con período de incubación de 10 días y luego de P	0,002x + 2E-5	0,931	500	100
	Incorporación simultánea de P y emulsión	0,001x + 1,1E-5	0,943	769	118
Ultisol roca fosfórica	Control	0,021x + 0,004	0,957	48	5
	Incorporación primeramente de P y luego de emulsión	0,020x + 0,005	0,955	50	5
	Incorporación primeramente de emulsión y luego de P	0,027x + 0,009	0,938	40	4
	Incorporación primeramente de emulsión con período de incubación de 10 días y luego de P	0,033x + 0,009	0,943	30	2
	Incorporación simultánea de P y emulsión	0,023x + 0,009	0,934	43	4
Entisol	Control	0,010x + 0,002	0,861	100	6
	Incorporación primeramente de P y luego de emulsión	0,011x + 0,003	0,806	91	6
	Incorporación primeramente de emulsión y luego de P	0,012x + 0,003	0,864	83	5
	Incorporación primeramente de emulsión con período de incubación de 10 días y luego de P	0,014x + 0,003	0,889	71	4
	Incorporación simultánea de P y emulsión	0,011x + 0,002	0,862	91	5
Entisol roca fosfórica	Control	0,023x + 0,007	0,806	43	4
	Incorporación primeramente de P y luego de emulsión	0,023x + 0,006	0,835	42	4
	Incorporación primeramente de emulsión y luego de P	0,033x + 0,010	0,800	30	3
	Incorporación primeramente de emulsión con período de incubación de 10 días y luego de P	0,055x + 0,015	8,839	18	2
	Incorporación simultánea de P y emulsión	0,025x + 0,014	0,889	40	3

Como se puede apreciar en las Tablas anteriores, las isothermas muestran en forma general un ajuste lineal bastante aceptable al modelo de Langmuir, mostrando coeficientes R^2 cercanos entre sí. No observándose mayor diferencia, entre los valores obtenidos al aplicar la emulsión catiónica, con los obtenidos con la emulsión aniónica.

Dado a que se trabajó en un rango de concentraciones bajo (desde 0 hasta 100 $\mu\text{g/g}$), se puede decir que las isothermas se ajustaron satisfactoriamente a dicho modelo ya que se pudo garantizar que las moléculas adsorbidas se encontraran localizadas en centros específicos y que sólo pueden adsorberse en una monocapa, donde no hay interacción entre las moléculas adsorbidas entre sí ^[99]. Esto coincide con Udo y Uzo ^[100], los cuales encontraron que en suelos tropicales de Nigeria (África), con gran capacidad de adsorción y a bajas concentraciones de fosfato en equilibrio, la adsorción podía ser descrita por Langmuir. Encontrando que la adsorción, se correlacionaba significativamente con sesquióxidos y formas intercambiables de Fe y Al, así como también con el contenido de arcilla.

Adicionalmente, se determinó el coeficiente de adsorción máxima de Langmuir (X_m), el cual se obtuvo a partir del valor inverso de la pendiente de cada uno de los ajustes lineales realizados a las isothermas. Este coeficiente es de especial importancia, ya que nos permite corroborar, por comparación entre los mismos, cual es la situación de competencia iónica que muestra los mejores efectos en la disminución de la adsorción de P por parte del suelo.

Los valores de adsorción máxima (X_m) reportados en las Tablas 12 y 13, muestran en forma general que los resultados obtenidos en los casos donde se aplicaron las emulsiones asfálticas de rompimiento lento antes, con un período de incubación de 10 días y simultáneamente con P, fueron menores que los obtenidos cuando se aplicó el P antes que las emulsiones y en las isothermas controles. Esto

evidencia nuevamente el posible efecto bloqueador que ejercen los surfactantes presentes en las emulsiones, lo que se traduce en una disminución en la adsorción de P

Al observar todos los X_m obtenidos, se pudo corroborar que el Ultisol adsorbió más P que el Entisol, esto se debió al contenido de arcilla, por lo antes explicado. Pero de todos los suelos, el Entisol roca fosfórica al que se le aplicó las emulsiones con un período de incubación de 10 días, de todos dio los mejores resultados; es decir, los X_m más bajos. Esto posiblemente se debió a un conjunto de factores que influyeron en la adsorción de P, como lo es el bajo contenido de arcilla de estos suelos (4%), la aplicación de la roca fosfórica y el tiempo que se dio para que las emulsiones interactuarán más efectivamente con el suelo.

Por otra parte, los valores de X_m encontrados para el suelo Ultisol control, se asemejan a los reportados por Siegert ^[93], quien encontró valores para Mantecal-Bajío y Q_{10} de 1485,9 y 253,8 ($\mu\text{g P} / \text{g suelo}$), respectivamente. Mientras que Berroterán ^[101] encontró un valor de X_m de 114 ($\mu\text{g P} / \text{g suelo}$), para un Ultisol ubicado al noroeste del Edo. Bolívar (Venezuela). De acuerdo al índice de adsorción de Bache y Williams ^[93], se pueden encontrar valores para suelos Ultisoles, de 262,9 ($\mu\text{g P} / \text{g suelo}$) para el caso de Mantecal-Bajío y 74,8 ($\mu\text{g P} / \text{g suelo}$) para el Q_{10} . Los valores reportados por Berroterán ^[101] y en el índice de Bache y Williams ^[93] son muchos más bajo que los que aquí se reportan.

En cuanto a los valores obtenidos de K; se puede decir, que el Ultisol retiene con mayor fuerza el P que el Entisol, pero cuando son fertilizados dichos suelos, su capacidad para retener P disminuye, como fue mencionado antes.

4 EFECTO DOSIS

En la Tabla 14, se puede observar el efecto bloqueador que tuvieron las emulsiones (aniónica y catiónica) aplicadas en diferentes dosis (0,00; 0,13; 0,25; 0,50; 1,00; 4,00; y 6,70) Mg/ha en forma simultánea con 50 ($\mu\text{g/g}$) de P, sobre el suelo Entisol control. En dicha Tabla, se puede notar que las dosis (0,00; 0,13; 0,25) Mg/ha de ambas emulsiones no ejercieron un efecto bloqueador relevante sobre los sitios activos de adsorción de P en el suelo de estudio. Mientras que, las dosis de (0,50; 1,00; 4,00) Mg/ha aplicadas de ambas emulsiones ejercieron un efecto bloqueador en forma decreciente sobre los sitios activos de adsorción de P; es decir, que la dosis de 0,50 Mg/ha fue más efectiva que la de 1,00 Mg/ha y esta, a su vez fue más efectiva que la de 4,00 Mg/ha. Por otro parte, la dosis de 6,70 Mg/ha mostro un efecto bloqueador no tan efectivo como las anteriores.

Tabla 14. Valores de P adsorbido y la concentración en equilibrio

Suelo	Dosis para ambas emulsiones (Mg/ha)	Emulsión catiónica		Emulsión aniónica	
		$\mu\text{g P/ g suelo}$	Ceq ($\mu\text{g/ mL}$)	$\mu\text{g P/ g suelo}$	Ceq ($\mu\text{g/ mL}$)
Entisol control	0,00	15,685	0,745	15,673	0,746
	0,13	15,401	0,768	15,281	0,778
	0,25	15,359	0,771	15,248	0,780
	0,50	10,910	1,127	10,823	1,134
	1,00	11,108	1,111	11,034	1,117
	4,00	11,487	1,081	11,363	1,091
	6,70	12,514	0,999	12,390	1,009

En la siguiente Tabla 15 se pueden observar los pH de las isotermas obtenidas.

Tabla 15. Valores de pH de las isotermas del efecto dosis

$[\text{KH}_2\text{PO}_4]$ $\mu\text{g/g}$	Dosis para ambas emulsiones (Mg/ha)	Emulsión Catiónica	Emulsión Aniónica
50	0,00	4,143	4,136
	0,13	3,901	3,813
	0,25	3,644	3,683
	0,50	3,660	3,668
	1,00	3,676	3,627
	4,00	4,124	4,118
	6,70	4,109	4,098

Dado que las dosis de emulsión aplicadas fueron obtenidas a partir de una dilución (1/100); se podría decir, que cuando se aplicaron las diferentes dosis al suelo, lo que posiblemente se aplicó fueron tamaños más pequeños de partículas que los que se tenían inicialmente. El efecto bloqueador observado, por parte de las dosis (0,50; 1,00; 4,00; y 6,70) Mg/ha se pudo entonces, deber al tamaño de las partículas de la emulsión, ya que con el efecto dosis posiblemente se vario el tamaño de las partículas. En soluciones miscelares normales (O/W) cuando se solubiliza en agua, ocurre un hinchamiento de las miscelas asfalto-surfactante logrando alcanzar diámetros de varios centenares de Angstroms. Obteniéndose, microgotas de aceite recubiertas por una monocapa de surfactante, es decir, una microdispersión líquido-líquido constituida por gotas extremadamente pequeñas. Conocida, como "microemulsión" o "nanoemulsión" [102] [103] [104] [105]. Partiendo; de este hecho, podemos pensar que las microgotas de aceite recubiertas por surfactantes que se desprendieron de las emulsiones compitieron más efectivamente por los sitios activos de adsorción y desplazaron los grupos (OH) protonados, presentes en la superficie del suelo. Pudiéndose deber, el efecto observado en las dosis (0,50- 6,70 Mg/ha) a lo antes mencionado.

Por otra parte, Marszall ^[106] establece que cuando se adiciona agua a sistemas constituidos por agua, surfactante y aceite sin necesidad de una fuerte agitación y a temperatura constante, ocurre una inversión de fases O/W a W/O que con llevan a la obtención de "microemulsiones" o "nanoemulsiones", este método se conoce como "Emulsion Inversion Point" (EIP).

En las dosis (0,00; 0,13; 0,25) Mg/ha el efecto bloqueador de las microgotas de aceite (surfactantes) fue despreciable ya que por posiblemente tratarse de concentraciones tan pequeñas, no alcanzaron el tamaño suficiente para cubrir los sitios activos y de esta forma el P es adsorbido por el suelo, no pudiendo ejercer un eficiente efecto bloqueador.

5 CONCLUSIONES

- El suelo Ultisol tiene una muy alta capacidad de P en comparación al Entisol. Esto se debe a la pedogénesis contrastante de dichos suelos.
- La aplicación de las emulsiones asfálticas previa y simultáneamente a la aplicación de P, afectaron notablemente las isothermas de adsorción de fosfato a medida que aumenta la concentración de fósforo, produciéndose una mayor separación de la curva de adsorción original (control). Mientras, que si se aplican las emulsiones después que el P, no se observa efecto alguno en las isothermas. Debido a que la afinidad del P por la superficie adsorbente es mayor que la de la emulsión.
- Cuando se aplican las emulsiones con un período de incubación de 10 días, las isothermas de adsorción se ven grandemente afectadas a medida que aumenta la concentración de fósforo, produciéndose una marcada separación de la curva de adsorción original (control).
- La incorporación de las dosis de emulsión (0,50; 1,00; 4,00) Mg/ha disminuye considerablemente la adsorción de P. Mientras que la dosis de 6,70 Mg/ha, disminuye medianamente la adsorción de P y las dosis (0,00; 0,13; 0,25) Mg/ha no ejercen efecto alguno en la disminución de la adsorción de P.
- La emulsión cuando se aplica con un período de incubación de 10 días, simultáneamente y antes que el P, se adsorbe más firmemente que el fosfato.
- La disminución de la adsorción de P por parte de las emulsiones, se debe no solo a la formación de macroagregados de asfalto en torno a las partículas de arcilla, si

no también, al efecto individual de los surfactantes que se desprenden de las miscelas (asfalto-surfactante) durante el proceso de rompimiento de las emulsiones, los cuales, por presentar un menor tamaño (menor impedimento estérico) pueden competir más eficientemente con los iones (H_2PO_4^-) por los sitios activos de adsorción de P presentes en el suelo, pudiendo ser quimiadsorbidos.

- La presencia de la roca fosfórica en los suelos de estudio, favoreció considerablemente la disponibilidad de P, disminuyendo la adsorción del mismo.
- Las isothermas de adsorción estudiadas se adaptan muy bien al modelo linealizado de Langmuir, ya que se obtuvieron valores de coeficientes de correlación muy cercanos a la unidad, teniéndose así un elevado poder predictivo.
- En los casos donde se aplicaron las emulsiones, no se observó diferencia relevante en la disminución de P entre la emulsión catiónica y aniónica. No pudiéndose establecer cual de las dos ofrece mayor ventaja en la disminución de P.

6 RECOMENDACIONES

A continuación se presentan algunas recomendaciones que se consideran importantes y que puedan ser útiles para los trabajos posteriores.

- Realizar experiencias a nivel de campo que permitan evaluar los beneficios y/o posibles daños que podría introducir la incorporación de emulsiones asfálticas a los suelos, aguas, vida vegetal y humana, a corto y largo plazo.
- Continuar realizando investigaciones sobre los suelos ácidos del país, para tratar de determinar los posibles efectos de las emulsiones sobre la química de estos.
- Realizar más experimentos que involucren “microemulsiones” o “nanoemulsiones”, con el fin de determinar con más precisión su efecto bloqueador sobre la adsorción de P.
- Determinar los elementos que componen la emulsión y evaluar sus niveles de toxicidad ambiental.
- Realizar experiencias combinadas, que involucren la incorporación a suelos ácidos de “microemulsiones” o “nanoemulsiones” con roca fosfórica acidulada o calcinada, para determinar que tan beneficio y provechoso puede resultar en la disminución de la adsorción de P.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Sarmiento, G.** 1990. Las Sabanas Americanas: Aspectos de su biogeografía, ecología y utilización, Fondo Editorial Acta Científica Venezolana, Mérida.
- [2] **Sarmiento, G.** 1992. Adaptive strategies of perennial grasses in South American savannas. *Journal of Vegetation Science*, Vol. 3, N° 3, Editorial: Opulus Press, Sweden, 325-336.
- [3] <http://usuarios.lycos.es/zandoli/web3/Capacidad%20de%20intercambio%20cat ionico.html>. Último día de consulta: 26/06/08.
- [4] <http://www.Fundacite.arg.gov.ve/proyectos/proyecto2.shtml?codigo=160>. Último día de consulta: 11/05/08.
- [5] **Pérez, M.** 2002. Alternativas en el manejo agroecológico y sucesión temprana en sabanas de drenaje interno rápido, ubicadas al norte del estado Amazonas. TEG, Escuela de Biología, Facultad de Ciencias, U.C.V., 13-32.
- [6] <http://www.elergonomista.com/fisiologiavegetal/mineral.htm>. Último día de consulta: 26/06/08.
- [7] <http://articulos.infojardin.com/articulos/Nutrientes.htm>. Último día de consulta: 26/06/08.
- [8] **Brady, N. C., y R. R. Weil.** 2001. *The Nature and Properties of Soils*. 13th Edition. Prentice Hall, New Jersey, USA. 1-167 y 375-557.
- [9] **López-Hernández, D. y A. Ojeda.** 1996. Alternativas de manejo agroecológico de los suelos de las sabanas al norte de Suramérica, *Sociedad Venezolana de Ecología*, *Ecotrópicos* 9(2): 101-117.
- [10] <http://www.fertilizar.org.ar/articulos/importancia%20del%20fosforo%20organico %20 del suelo.htm>. Último día de consulta: 28/10/07.
- [11] **Adams, M.** 1995. *Fundamentos de química de suelos*, Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, U.C.V., Caracas-Venezuela. 390 p.
- [12] [http://www.ppi.--ppic.org/ppiweb/mexnca.nsf/\\$webindex/0D2745E9793640FD06](http://www.ppi.--ppic.org/ppiweb/mexnca.nsf/$webindex/0D2745E9793640FD06)

256AAE00136ECB?opendocument&navigator=home+pagekk. Último día de consulta: 12/05/08.

[13] **Pla, I., A. Florentino y D. Lobo.** 1981. Regulación del régimen hídrico de suelo bajo agricultura de secano en Venezuela mediante la aplicación superficial de emulsiones de asfalto, *Revista Facultad de Agronomía (Maracay)*, 12(1-2): 137-163.

[14] **Lobo, D., I. Pla y A. Florentino.** 1983. Uso de emulsiones de asfalto para incrementar y regular la productividad de maní en un Ultisol arenoso de la Mesa de Guanipa, *Agronomía Tropical*, 34 (1-3): 43-48.

[15] [http:// www.minem.gob.pe /archivos/dgaee/publicaciones/resumen/egemsa-1/in dice.pdf](http://www.minem.gob.pe/archivos/dgaee/publicaciones/resumen/egemsa-1/in dice.pdf). Último día de consulta: 11/05/08.

[16] **Casanova, E.** 1996. Introducción a la ciencia del suelo, Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, U.C.V., Caracas- Venezuela. 61-247,482.

[17] **Baamonde, J.** 2004. Petrología, Instituto de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias, U.C.V., Caracas- Venezuela. 239 p.

[18] **Schaetzl, R. y S. Anderson.** 2005. *Soils: Genesis and Geomorphology*, Cambridge Univ. Press., New York, Hardcover. 816 p.

[19] **Baize, D. y M. C. Girard.** 1998. A Sound Reference Base for Soils: The "Référentiel Pédologique", Publisher: INRA, Paris. 11 p.

[20] **Tisdall, J. y J. Oades.** 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils, *Journal of Soil Science* (33), 141-163.

[21] **Duran A., J. Zamalvide., F. García y M. Hill.** 2008. Propiedades Físico-Químicas de los suelos. Tema Práctico 5. Guía Docente. Cátedra de Edafología. Universidad de la República Oriental del Uruguay. Montevideo, Uruguay. 60 p.

[22] http://gmg.unizar.es/gmgweb/Asignaturas/GeologiaSuelos/apuntes/Tema8_Adsorcion.pdf. Último día de consulta: 04/07/08.

[23] **Langmuir, D.** 1997. *Aqueous Environmental Geochemistry*, Prentice Hall, New Jersey, U.S.A. 344 p.

[24] **Díaz, N.** 2005. Transformación de fósforo orgánico en un suelo ácido de sabana tratado con enmiendas orgánicas, TEG, Facultad de Ciencias, Escuela de Química,

U.C.V. 98 p.

- [25] **Talibudeen, O.** 1981. The chemistry of soil processes, Greenland and Hayes, Iowa. 237p.
- [26] **Zapata, R.** 2004. Química de la acidez del suelo. Cali, Colombia. 208 p.
- [27] <http://www.zeta-meter.com>. Último día de consulta: 12/05/08.
- [28] http://www.uclm.es/users/higuera/MGA/Tema03 / Tema _ 03 _ Suelos _ 2.htm. Último día de consulta: 01/07/08.
- [29] **Castillo, E.** 2005. Influencia de la rizósfera en los cambios de la fracción de fósforo disponible en suelos ácidos, TEG, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, U.C.V. 8-11.
- [30] Soil Science Society of América. 1965. Glosario de términos en las ciencias del suelo, Soil Science Soc. Am. Proc., 29(3), 330-351.
- [31] <http://www.infoagro.com>. Última día de consulta: 14/04/08.
- [32] **Sposito, G.** 1989. The Surface Chemistry of Soils, Oxford University Press, Nueva York. 51 p.
- [33] <http://www.lenntech.com/espanol/tabla-periodica/p.htm>. Último día de consulta: 12/05/08.
- [34] <http://www.fertilizando.com/articulos/Movilidad%20del%20Fosforo%20en%20el%20Suelo.asp>. Último día de consulta: 12/05/08.
- [35] **López-Hernández, D.** 1977. La química del fósforo en suelos ácidos, Ediciones de la Biblioteca, Colección de Ciencias Biológicas VI, Facultad de Ciencias, U.C.V. 36, 58-61, 123 p.
- [36] [http://www.inpofos.org/ppiweb/mexnca.nsf/\\$webindex/2ABDB9446130D3B286256CD300636AD1?opendocument&navigator=conozca+las+deficiencias+de+nutrientes](http://www.inpofos.org/ppiweb/mexnca.nsf/$webindex/2ABDB9446130D3B286256CD300636AD1?opendocument&navigator=conozca+las+deficiencias+de+nutrientes). Último día de consulta: 05/07/08.
- [37] **Bornemisza, E.** 1982. Introducción a la química de suelos, Secretaría General de la organización de estados americanos, Programa regional de desarrollo científico y tecnológico, Serie Química, monografía N° 25, Washington, D.C., 1-51.
- [38] **Stevenson, F. y M. Cole.** 1999. Cycles of Soil, John Wiley & Sons, Inc. Second

Edition, U.S.A., 1-17.

[39] <http://www.edafología.urg.es/index.html>. Último día de Consulta: 06/07/08.

[40] http://www.ingeminas.gov.co/component/option,com_glossary/func,display/letter.R/Itemid,124/catid,82/limit,15/limitstart,135/. Último día de consulta: 01/08/08.

[41] **Borie, F y J.M. Barea.** 1981. Ciclo del fósforo: formas del elemento en los suelos y su disponibilidad para plantas y microorganismos. Edafología y Agrobiología. Tomo XL. Nums. 11-12. Madrid.

[42] **Murrell, T. S.** 2003. Transformaciones de los nutrientes en el suelo. Informaciones agronómicas. Instituto de la potasa y el fósforo – INPOFOS (49), 1-5.

[43] **Wood, C.W.** 1998. Soil testing for phosphorus: Environmental Uses and Implications, Publicación de SERA – IEG 17/ SCSB # 389, Capítulo 1.

[44] <http://www.clades.cl/revistas/8/rev89.htm>. Última día de consulta: 15/04/08.

[45] <http://www.wordreference.com/definicion/adsorci%C3%B3n>. Último día de consulta: 15/05/08.

[46] **Laidler, K. y J. Meisser.** 1982. Physical Chemistry, Addison Wesley, Capítulo 18. 827 p.

[47] **Castro, M.** Gráficos de adsorción del ión fosfato sobre superficies activas de suelo. Facultad de Agronomía y Facultad de Ingeniería. Trabajo científico. Universidad Nacional del Centro. Buenos Aires, Argentina, 4 p.

[48] **Levine, I.** 1993. Fisicoquímica, McGraw-Hill, Cap. 4, 417 p.

[49] http://www.redpavfpolar.info.ve/agrotrop/v26_5/v265a001.html. Última día de consulta: 16/06/08.

[50] **Rivero, C.** 1999. Materia Orgánica del suelo. Facultad de Agronomía. UCV. Maracay, Venezuela. 207 p.

[51] http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Calidad_Ambiental/Gestion_De_Los_Residuos_Solidos/compost/Uso_Compost.pdf. Última día de consulta: 11/07/08.

[52] <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/Compost.htm>. Último día de consulta: 11/07/08.

- [53] [http : // www. fertilizando. com / articulos /fertilizantes%20organominerales.asp](http://www.fertilizando.com/articulos/fertilizantes%20organominerales.asp).
Último día de consulta: 15/05/08.
- [54] **Rodríguez, R., J. M. Castaño y M. Martínez.** 2001. Emulsiones asfálticas. Instituto mexicano de transporte. Documento técnico N° 23. Sanfandila, México, 25-26, 41 p.
- [55] **Garnica, P., A. Manilla y F. Báez.** 2001. Evaluación en la pérdida de resistencia en concretos asfálticos por contacto de sustancias agresivas. Instituto mexicano del transporte. Publicación técnica N° 163. Queretaro, México.
- [56] **Baptista, A.** 1987. Caracterización mecánica de la estabilización de un suelo a base de emulsiones asfálticas y consideraciones estadísticas sobre los diseños de mezcla en suelos de Venezuela. TEG, Facultad de Agronomía, U.C.V. Maracay, Estado Aragua, 120 p.
- [57] **Deb, D y Datta, N.** 1967. Effect of associating anions on phosphorus retention in soil. I. Under variable phosphorus concentration, Plant and Soil (26), 303-316.
- [58] **Nagarajah, S., A. Posner y J. Quirk.** 1970. Competitive adsorption of phosphate with polygalacturonate and other organic anions on kaolinite and oxide surfaces. Nature (228), 83-84.
- [59] **Barrow, N.** 1970. The description of desorption of phosphate from soil. Soil Science (5), 282-288.
- [60] **Parfitt, R.** 1979. The availability of P from phosphate goethite bridging complexes. Desorption and uptake by ryegrass, Plant and soil (53), 55-65
- [61] **Reddy, K., M. Overchash, R. Khaled y P. Westerman.** 1980. Phosphorus adsorption-desorption characteristics of two soils utilized for disposal of animal wastes, J. Environmental Quality (9), 86-92.
- [62] **Sibanda, H y S. Young.** 1986. Competitive adsorption of humus acids and phosphate on goethite, gibbsite and two tropical soils, J. Soil. Sci. (37), 197-204.
- [63] **López-Hernández, D. Siegert y G. Rodríguez.** 1986. Competitive adsorption of P with malate and oxalate by tropical soils, Soil Sci. Soc. Am. J. (50), 1460-1462.
- [64] **Faria, E., V. Hernando y M. Pardo.** 1987. Effect of silicate and pumice stone on

the P adsorption capacity of variable charge soils, *Agrochimica* (31), 309-316.

[65] **Kafkafi, U., B. Bar Yosef y G. Sposito.** 1988. Phosphorus adsorption by kaolinite and montmorillonite: II organic anion competition, *Soil .Sci.Soc.Am. J.* (52), 1585-1589.

[66] **Vázquez, S. y L. A, Morales.** 2000. Adsorción de fósforo por suelos ácidos de misiones (Argentina). *Ciencia del suelo* 18(2), 82-94.

[67] **Pla, I., D. Lobo y A. Florentino.** 1983. Uso de emulsiones de asfalto para incrementar y regular la productividad de sorgo en un Alfisol franco-arenoso de los llanos ondulados del norte de Estado Guárico – Sector Chaguaramas, *Revista de la Facultad de Agronomía. U.C.V. Maracay, Venezuela.*

[68] **Salem, N., M. Verloo y M. De Boodt.** 1985. Effects of bituminous emulsions on retention and release of some chemical elements in two soil samples, *Geoderma.* 35, 241-249.

[69] **Sánchez, S.** 1999. Efecto de los abonos orgánicos y la emulsión asfáltica sobre la conservación de suelos, agua, nutrientes y el rendimiento del cultivo de cebollín, Tesis de Maestría, Facultad de Agronomía, U.C.V, Maracay, Venezuela.

[70] **Fortún, C. y A. Fortún.** 2005. Quantification of soil aggregates treated with bituminous emulsion and other organic amendments by using scanning electron microscope, *arid land research and management*, Taylor & Francis 19: 183-195.

[71] **Herrera, T.** 2007. Efecto de las emulsiones asfálticas sobre la adsorción de fósforo en suelos ácidos, Trabajo Especial de Grado, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, U.C.V. 58, 69-70, 127.

[72] **Morales, F.** 2008. Efecto combinado de las emulsiones asfálticas catiónica y aniónica sobre la adsorción de fósforo en un suelo ácido de sabana, Trabajo Especial de Grado, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, U.C.V. 5-11.

[73] <http://cesimo.ing.ula.ve/LA-ECO-RED/ECORED/iguana/index.htm>. Último día de consulta: 15/01/09.

[74] http://www.ecored.ula.ve/estaciones/ubicación_iguana.php. Último día de consulta: 15/05/08.

- [75] <http://www.pdv.com/lexico/m40w.htm>. Último día de consulta: 13/07/08
- [76] <http://izt.ciens.ucv.ve/junin>. Última día de consulta: 13/07/08.
- [77] **Matheus, R.** 1987. Los suelos de la Estación Experimental La Iguana, Sureste del Estado Guárico, [Soils at Iguana Experiment Station, in southeastern Guarico], Tesis de Maestría, Facultad de Agronomía, U.C.V, Maracay, Venezuela.
- [78] **Ministerio de Minas e Hidrocarburos.** 1956. Léxico estratigráfico de Venezuela. Bol. Geol. Public. Espec. 1, 728 p
- [79] **Murphy., J. y J. Riley.** 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal. Chim. Acta 27:31-36.
- [80] **López-Hernández, D; C.P. Burnham.** 1974. The effect of pH on phosphate adsorption in soils, J. Soil Sci. , 25:207-216.
- [81] **Bache, B. y E. Williams.,** (1971). A phosphate sorption index for soils; Soil Sci., 22: 289-301.
- [82] **López, J.** 2003. Rol de las micorrizas arbusculares y los microorganismos en la mineralización de P orgánico en suelos ácidos de sabana. Trabajo Doctoral. Facultad de Ciencias.U.C.V. Caracas, Venezuela. 28 p.
- [83] **Núñez, R y F. Gavi.** 1991. Avances de las investigaciones sobre aplicación directa de roca fosfórica en México. Revista de la Facultad de Agronomía (UCV) 17:197-216.
- [84] **Pérez, M., B. Troung y J. Fardeau.** 1995. Solubilidad y eficiencia agronómica de algunas rocas fosfóricas venezolanas (naturales y modificadas) mediante el uso de técnicas isotópicas. Agronomía tropical 45(4): 483-505.
- [85] **López, I., R. Mercado, A. Sánchez, L. Nieves y H. Wiedenhofer.** 1997. Efecto residual de la roca fosfórica en un ultisol del estado Cojedes a través de cuatro años de evaluación. Agronomía Tropical 47(2): 185-189.
- [86] **Mott, C. J. B.** 1970. Sorption of anions by soils. Departament of Soil Science, University of Reading. 5.
- [87] **Muljadi, A., M. Posner y J. P. Quirk.** 1966. The Mechanism of phosphate adsorption by Kaolinite, Gibbsite and Pseudoboehmite. Journal of Soil Science

17(2): 230-37.

[88] Ryden., J. C. y J. K. Syers. 1977. Mechanisms of phosphate sorptions by soil and hydrous ferric oxide gel. *Soil Science* 28: 72-92.

[89] Hu, H.; J. He; X. Li y F. Liu. 2001. Effect of several organic on Phosphate adsorption by variable charge soil of central China. *Elsevier Science Ltd.* 26:356-358p.

[90] Violante, A.; M. Pigne; M. Ricciardella y L. Gianfreda. 2002. Adsorption of phosphate on variable charge minerals and soils as affected by organic and inorganic ligands. *Developments in soil science.* 28: 279-295p.

[91] Hingston, F. J., Posner, A. M. y Quirk, J. P. 1972. Anion adsorption by goethite and gibbsite I. The role of the proton in determining adsorption envelopes. *Journal Soil Science* 23: 177-190.

[92] Flores, D. 1974. Desorción y adsorción de fosfato en suelos, Trabajo Especial de Grado, Escuela de Biología, U.C.V. 18, 59-64.

[93] Siegert, C. 1976. Competencia del malato con el fosfato por los sitios de adsorción en suelos, Trabajo Especial de Grado, Escuela de Biología, U.C.V. 51-55,66.

[94] Rodriguez, J. V. 1976. Competencia del oxalato con el fosfato en suelos por los sitios de adsorción, Trabajo Especial de Grado, Escuela de Química, U.C.V. 57-62, 68, 70.

[95] Alayon, M. 2004. Plan piloto en especialidades Químicas, Asfaltenos ocurrencia y floculación. Cuaderno FIRP S369-PP, módulo de enseñanza en fenómenos interfaciales en español. Universidad de los andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, Mérida- Venezuela. 19 p.

[96] Barreto, J. 2008. Efecto de diferentes tipos de emulsiones asfálticas (aniónica y catiónica) de rompimiento lento sobre la adsorción de P en caolinita, Trabajo Especial de Grado, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, U.C.V. 85-86p..

[97] Loeber, L., S. Alexander, G. Muller, J. Triquegneaux, Y. Jolivet y M. Malot. 1999. Bituminous Emulsion and their characterization by atomicforce microscopy. *Journal of microscopy.* N° 198. 10-16p.

- [98] Asphalt Institute and Asphalt Emulsion Manufacturers Association (AEMA). Manual Básico de Emulsiones Asfálticas-Serie N° 19. U.S.A. 112p.
- [99] **Levine., I.** 1982. Fisicoquímica. Tomo I. Editorial Mc Graw Hill. Bogotá, Colombia. 630 p
- [100] **Udo, E. U. y F. O. Uzo.** 1972. Characteristics of phosphorus adsorption by some Nigerian soils, Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 36: 879-883.
- [101] **Berroterán., R.** 2003. Estudio de adsorción de fósforo en la fracción pesada de la materia orgánica de suelos sometidos a manejos agronómicos contrastantes. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ciencias. U.C.V. Caracas, Venezuela. 86 p.
- [102] **Schulman, J.H. ; Stoeckenius, W.; Prince,L.M.** 1959.J. Phys. Chem. 63,1677.
- [103] **Prince, L.M.** Microemulsions: Theory and Practice. Academic Press.1977.
- [104] **Robb, I.D.** 1982. Microemulsions. Plenum Press, New York.
- [105] **Bourrel, M.; Schechter, R.S.** 1988. Microemulsions and Related Systems. Marcel Dekker, New York.
- [106] **Marszall, L.** 1975. Cosmet. Perf. 90, 2 y 37.

Anexos

Anexo 1. pH metro marca Orión modelo 720 A**Características del equipo:**

- Resolución del rango de pH $\pm 0,01$
- Exactitud relativa $\pm 0,002$

Anexo 2. Espectrofotómetro de doble haz marca VARIAN modelo 634**Características del equipo**

- Rango de longitud de onda: 190 nm-900nm
- Exactitud fotométrica: $\pm 0,002$ Abs
- Estabilidad del cero: 0,0004 Abs/hora
- Resolución: 0,2 nm
- Lámparas: UV – 30W Deuterio y Vis – 50W tungsteno
- Dimensiones: 72x40x33 cm

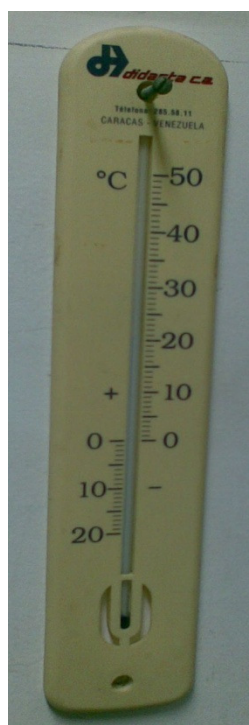
Anexo 3. Espectrofotómetro Unico 1100 RS



Características del equipo

- Exactitud fotométrica: 0-125% T/0-1.999 Abs
- Rango de la longitud de onda: 335 nm - 1000 nm
- Resolución: 20 nm
- Salida de datos: digital
- Exactitud de la longitud de onda: +/- 2nm

Anexo 4. Agitador Marca GYROTORRY modelo G76 y termómetro indicador de la temperatura en la cual se llevaron a cabo los experimentos.

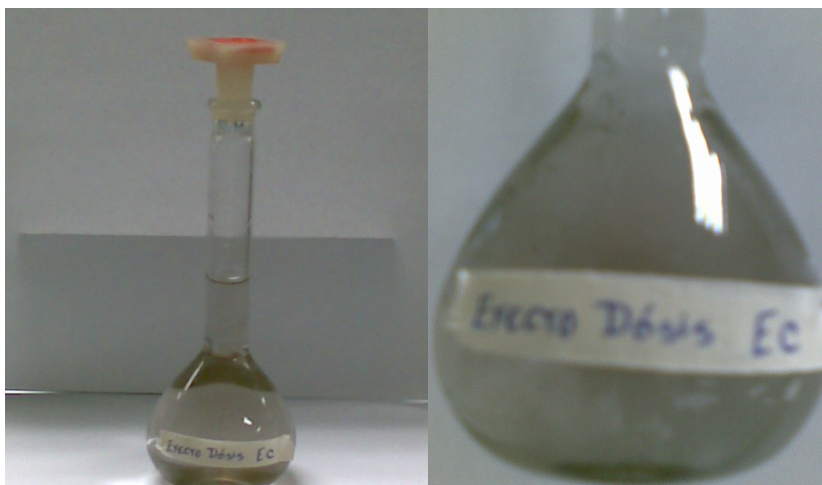
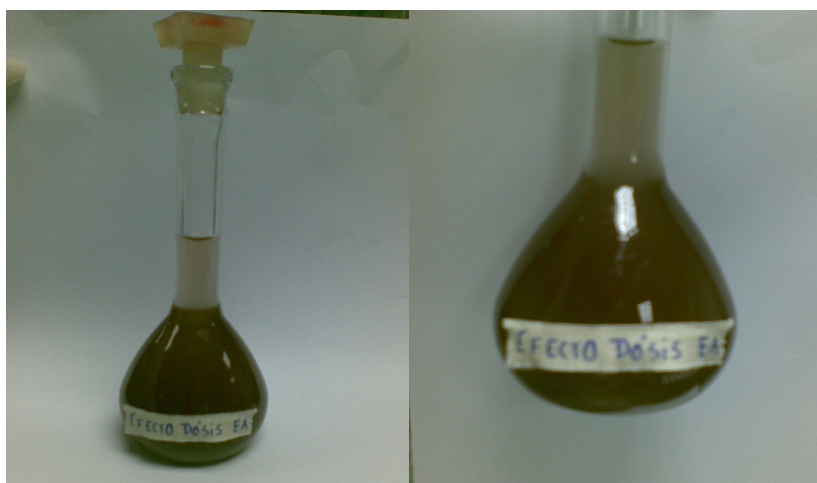


Anexo 5. Forma de agitación experimental de las isotermas



Anexo 6. Filtración de las isotermas



Anexo 7. Dilución del efecto dosis (1/100)**Emulsión catiónica****Emulsión aniónica**

Anexo 8. Murphey – Riley de las isothermas del efecto dosis



Emulsión catiónica



Emulsión aniónica

Apéndice

Apéndice 1. Resultados de las isotermas.

ISOTERMA CONTROL					
Suelo	Dosis inicial de P ($\mu\text{g/g}$)	Ceq ($\mu\text{gP/mL}$)	S _{ceq}	$\mu\text{g P}_{\text{adsorbido}}$ / g suelo	S _{$\mu\text{g Padsorbido}$} / g suelo
Ultisol	0	0,000	0,000	0,000	0,000
	20	0,000	0,000	10,000	0,000
	40	0,002	0,002	19,979	0,030
	50	0,005	0,002	24,941	0,024
	60	0,008	0,003	29,898	0,036
	80	0,014	0,005	39,830	0,060
	100	0,044	0,005	49,447	0,060
Entisol	0	0,022	0,007	0,000	0,000
	20	0,121	0,046	8,484	0,571
	40	0,262	0,000	16,726	0,000
	50	0,342	0,007	20,720	0,090
	60	0,446	0,002	24,430	0,030
	80	0,645	0,002	31,936	0,030
	100	0,934	0,002	38,322	0,030
Ultisol roca fosfórica	0	0,040	0,064	0,000	0,000
	20	0,118	0,031	8,524	0,384
	40	0,461	0,007	14,235	0,089
	50	0,763	0,045	15,461	0,561
	60	1,009	0,031	17,383	0,384
	80	1,555	0,047	20,557	0,591
	100	2,151	0,084	23,095	1,063
Entisol roca fosfórica	0	0,016	0,000	0,000	0,000
	20	0,202	0,000	7,479	0,000
	40	0,578	0,000	12,772	0,000
	50	0,846	0,000	14,430	0,000
	60	1,104	0,000	16,199	0,000
	80	1,592	0,003	20,096	0,042
	100	2,336	0,005	20,797	0,059

ISOTERMA EN LA QUE SE INCORPORA PRIMERAMENTE EL P Y LUEGO LA EMULSIÓN CATIONICA					
Suelo	Dosis inicial de P ($\mu\text{g/g}$)	Ceq ($\mu\text{gP/mL}$)	S _{ceq}	$\mu\text{g P}_{\text{adsorbido}}$ / g suelo	S _{$\mu\text{g Padsorbido}$} / g suelo
Ultisol	0	0,000	0,000	0,000	0,000
	20	0,000	0,000	10,000	0,000
	40	0,003	0,002	19,962	0,030
	50	0,006	0,004	24,919	0,046
	60	0,010	0,005	29,871	0,065
	80	0,016	0,007	39,800	0,089
	100	0,043	0,006	49,467	0,079
Entisol	0	0,000	0,000	0,000	0,000
	20	0,098	0,028	8,781	0,346
	40	0,256	0,012	16,799	0,151
	50	0,360	0,021	20,504	0,266
	60	0,473	0,026	24,089	0,328
	80	0,683	0,011	31,465	0,141
	100	0,976	0,033	37,797	0,407
Ultisol roca fosfórica	0	0,007	0,005	0,000	0,000
	20	0,110	0,009	8,623	0,109
	40	0,431	0,034	14,608	0,421
	50	0,726	0,019	15,926	0,239
	60	1,049	0,026	16,883	0,325
	80	1,613	0,012	19,834	0,156
	100	2,122	0,029	23,470	0,357
Entisol roca fosfórica	0	0,000	0,000	0,000	0,000
	20	0,098	0,028	7,009	0,218
	40	0,256	0,012	12,098	0,086
	50	0,360	0,021	14,421	0,022
	60	0,473	0,026	16,845	0,087
	80	0,683	0,011	19,811	0,139
	100	0,976	0,033	19,961	0,095

ISOTERMA EN LA QUE SE INCORPORA PRIMERAMENTE EL P Y LUEGO LA EMULSIÓN ANIÓNICA					
Suelo	Dosis inicial de P (µg/g)	Ceq (µgP/mL)	S _{ceq}	µg P _{adsorbido} / g suelo	S _{µg Padsorbido} / g suelo
Ultisol	0	0,000	0,000	0,000	0,000
	20	0,000	0,000	10,000	0,000
	40	0,005	0,003	19,943	0,038
	50	0,007	0,002	24,910	0,030
	60	0,009	0,005	29,890	0,068
	80	0,018	0,008	39,781	0,097
	100	0,039	0,007	49,514	0,086
Entisol	0	0,001	0,001	0,000	0,000
	20	0,087	0,040	8,914	0,506
	40	0,284	0,034	16,452	0,431
	50	0,388	0,019	20,156	0,236
	60	0,464	0,022	24,199	0,281
	80	0,647	0,028	31,908	0,354
	100	0,963	0,027	37,969	0,333
Ultisol roca fosfórica	0	0,008	0,007	0,000	0,000
	20	0,161	0,007	7,985	0,094
	40	0,463	0,029	14,213	0,365
	50	0,770	0,021	15,379	0,257
	60	1,033	0,026	17,088	0,320
	80	1,581	0,008	20,237	0,101
	100	2,154	0,008	23,080	0,103
Entisol roca fosfórica	0	0,000	0,000	0,000	0,000
	20	0,208	0,017	7,399	0,216
	40	0,598	0,007	12,527	0,086
	50	0,874	0,010	14,074	0,120
	60	1,076	0,003	16,554	0,043
	80	1,615	0,011	19,811	0,139
	100	2,432	0,016	19,602	0,194

ISOTERMA EN LA QUE SE INCORPORA PRIMERAMENTE LA EMULSIÓN CATIÓNICA Y LUEGO EL P					
Suelo	Dosis inicial de P ($\mu\text{g/g}$)	Ceq ($\mu\text{gP/mL}$)	S _{ceq}	$\mu\text{g P}_{\text{adsorbido}}$ / g suelo	S _{$\mu\text{g P}_{\text{adsorbido}}$} / g suelo
Ultisol	0	0,000	0,000	0,000	0,000
	20	0,003	0,005	9,957	0,065
	40	0,010	0,002	19,876	0,030
	50	0,013	0,005	24,833	0,058
	60	0,020	0,002	29,752	0,022
	80	0,035	0,005	39,562	0,064
	100	0,058	0,005	49,276	0,068
Entisol	0	0,000	0,000	0,000	0,000
	20	0,178	0,025	7,780	0,315
	40	0,473	0,012	14,084	0,151
	50	0,589	0,028	17,632	0,351
	60	0,687	0,013	21,417	0,166
	80	1,034	0,035	27,078	0,436
	100	1,549	0,013	30,642	0,164
Ultisol roca fosfórica	0	0,018	0,005	0,000	0,000
	20	0,323	0,031	5,966	0,384
	40	0,708	0,024	11,146	0,305
	50	1,027	0,017	12,159	0,207
	60	1,356	0,005	13,051	0,065
	80	1,850	0,011	16,879	0,138
	100	2,613	0,013	17,338	0,161
Entisol roca fosfórica	0	0,037	0,002	0,000	0,000
	20	0,466	0,033	4,180	0,408
	40	0,819	0,044	9,764	0,553
	50	1,072	0,099	11,602	1,234
	60	1,345	0,005	13,187	0,064
	80	1,902	0,007	16,220	0,084
	100	2,642	0,012	16,981	0,144

ISOTERMA EN LA QUE SE INCORPORA PRIMERAMENTE LA EMULSIÓN ANIÓNICA Y LUEGO EL P					
Suelo	Dosis inicial de P (µg/g)	Ceq (µgP/mL)	S _{ceq}	µg P _{adsorbido} / g suelo	S _{µg Padsorbido} / g suelo
Ultisol	0	0,000	0,000	0,000	0,000
	20	0,002	0,005	9,971	0,065
	40	0,012	0,003	19,852	0,044
	50	0,016	0,006	24,805	0,079
	60	0,021	0,007	29,743	0,089
	80	0,035	0,006	39,562	0,079
	100	0,064	0,003	49,195	0,033
Entisol	0	0,012	0,021	0,000	0,000
	20	0,212	0,017	7,347	0,214
	40	0,491	0,003	13,861	0,041
	50	0,612	0,013	17,346	0,164
	60	0,730	0,024	20,869	0,295
	80	1,086	0,009	26,421	0,107
	100	1,549	0,013	30,642	0,164
Ultisol roca fosfórica	0	0,018	0,005	0,000	0,000
	20	0,323	0,031	6,604	0,601
	40	0,708	0,024	10,636	0,445
	50	1,027	0,017	11,664	0,139
	60	1,356	0,005	12,989	0,065
	80	1,850	0,011	16,695	0,101
	100	2,613	0,013	16,433	0,135
Entisol roca fosfórica	0	0,000	0,000	0,000	0,000
	20	0,427	0,016	4,661	0,195
	40	0,836	0,029	9,550	0,363
	50	1,100	0,018	11,254	0,225
	60	1,359	0,020	13,014	0,256
	80	1,934	0,010	15,830	0,123
	100	2,696	0,016	16,302	0,197

ISOTERMA EN LA QUE SE INCORPORA PRIMERAMENTE LA EMULSIÓN CATIÓNICA CON UN PERÍODO DE INCUBACIÓN DE 10 DÍAS Y LUEGO EL P					
Suelo	Dosis inicial de P (µg/g)	Ceq (µgP/mL)	S _{ceq}	µg P _{adsorbido} / g suelo	S _{µg Padsorbido} / g suelo
Ultisol	0	0,000	0,000	0,000	0,000
	20	0,009	0,007	9,892	0,085
	40	0,022	0,004	19,722	0,050
	50	0,031	0,008	24,609	0,094
	60	0,042	0,007	29,477	0,085
	80	0,066	0,016	39,180	0,194
	100	0,101	0,010	48,737	0,122
Entisol	0	0,000	0,000	0,000	0,000
	20	0,315	0,023	6,061	0,290
	40	0,658	0,027	11,774	0,343
	50	0,789	0,027	15,135	0,343
	60	0,904	0,017	18,702	0,212
	80	1,218	0,019	24,773	0,240
	100	1,496	0,012	31,296	0,156
Ultisol roca fosfórica	0	0,002	0,004	0,000	0,000
	20	0,473	0,009	4,087	0,110
	40	0,995	0,006	7,567	0,073
	50	1,280	0,003	8,999	0,037
	60	1,611	0,009	9,865	0,115
	80	2,156	0,010	13,051	0,127
	100	2,662	0,010	16,722	0,131
Entisol roca fosfórica	0	0,000	0,000	0,000	0,000
	20	0,534	0,022	3,329	0,273
	40	1,102	0,008	6,224	0,099
	50	1,401	0,012	7,493	0,156
	60	1,639	0,012	9,515	0,156
	80	2,242	0,051	11,974	0,632
	100	2,781	0,034	15,242	0,422

ISOTERMA EN LA QUE SE INCORPORA PRIMERAMENTE LA EMULSIÓN ANIÓNICA CON UN PERÍODO DE INCUBACIÓN DE 10 DÍAS Y LUEGO EL P					
Suelo	Dosis inicial de P (µg/g)	Ceq (µgP/mL)	S _{ceq}	µg P _{adsorbido} / g suelo	S _{µg Padsorbido} / g suelo
Ultisol	0	0,000	0,000	0,000	0,000
	20	0,010	0,007	9,878	0,085
	40	0,024	0,011	19,698	0,137
	50	0,032	0,007	24,600	0,085
	60	0,043	0,005	29,463	0,065
	80	0,065	0,016	39,190	0,201
	100	0,106	0,006	48,681	0,071
Entisol	0	0,000	0,000	0,000	0,000
	20	0,315	0,023	6,438	0,057
	40	0,658	0,027	11,435	0,130
	50	0,789	0,027	14,842	0,212
	60	0,904	0,017	18,514	0,240
	80	1,218	0,019	25,093	0,170
	100	1,496	0,012	31,296	0,156
Ultisol roca fosfórica	0	0,000	0,000	0,000	0,000
	20	0,507	0,009	3,663	0,110
	40	1,008	0,008	7,402	0,094
	50	1,306	0,002	8,675	0,031
	60	1,618	0,006	9,770	0,070
	80	2,136	0,005	13,296	0,059
	100	2,663	0,011	16,711	0,139
Entisol roca fosfórica	0	0,000	0,000	0,000	0,000
	20	0,555	0,015	3,065	0,188
	40	1,122	0,010	5,979	0,130
	50	1,381	0,011	7,738	0,139
	60	1,616	0,030	9,798	0,369
	80	2,242	0,051	11,974	0,632
	100	2,752	0,018	15,596	0,230

ISOTERMA EN LA QUE SE INCORPORA SIMULTÁNEAMENTE EL P Y LA EMULSIÓN CATIÓNICA					
Suelo	Dosis inicial de P ($\mu\text{g/g}$)	Ceq ($\mu\text{gP/mL}$)	S _{ceq}	$\mu\text{g P}_{\text{adsorbido}}$ / g suelo	S _{$\mu\text{g Padsorbido}$} / g suelo
Ultisol	0	0,000	0,001	0,000	0,000
	20	0,004	0,003	9,950	0,037
	40	0,008	0,006	19,905	0,081
	50	0,013	0,005	24,834	0,057
	60	0,018	0,003	29,772	0,040
	80	0,029	0,006	39,640	0,078
	100	0,052	0,005	49,350	0,068
Entisol	0	0,000	0,000	0,000	0,000
	20	0,285	0,005	7,885	0,274
	40	0,685	0,010	14,674	0,131
	50	0,813	0,017	18,411	0,305
	60	0,919	0,019	22,356	0,144
	80	1,193	0,014	28,586	0,379
	100	1,496	0,012	35,685	0,069
Ultisol roca fosfórica	0	0,000	0,000	0,000	0,000
	20	0,240	0,010	7,004	0,129
	40	0,630	0,021	12,120	0,265
	50	0,868	0,010	14,145	0,126
	60	1,181	0,003	15,241	0,034
	80	1,824	0,008	17,197	0,100
	100	2,447	0,009	19,416	0,109
Entisol roca fosfórica	0	0,047	0,002	0,000	0,000
	20	0,330	0,027	5,874	0,341
	40	0,726	0,038	10,920	0,480
	50	1,046	0,018	11,928	0,225
	60	1,346	0,006	13,180	0,072
	80	1,888	0,015	16,394	0,190
	100	2,578	0,023	17,771	0,282

ISOTERMA EN LA QUE SE INCORPORA SIMULTÁNEAMENTE EL P Y LA EMULSIÓN ANIÓNICA					
Suelo	Dosis inicial de P (µg/g)	Ceq (µgP/mL)	S _{ceq}	µg P _{adsorbido} / g suelo	S _{µg Padsorbido} / g suelo
Ultisol	0	0,000	0,000	0,000	0,000
	20	0,004	0,004	9,954	0,047
	40	0,009	0,002	19,884	0,026
	50	0,015	0,004	24,814	0,045
	60	0,018	0,003	29,777	0,033
	80	0,030	0,007	39,623	0,085
	100	0,049	0,006	49,392	0,074
Entisol	0	0,016	0,027	0,000	0,000
	20	0,170	0,016	7,881	0,198
	40	0,392	0,032	15,100	0,394
	50	0,500	0,006	18,755	0,074
	60	0,630	0,008	22,124	0,096
	80	0,954	0,011	28,081	0,141
	100	1,165	0,005	35,432	0,063
Ultisol roca fosfórica	0	0,009	0,015	0,000	0,000
	20	0,285	0,010	6,433	0,125
	40	0,650	0,027	11,872	0,332
	50	0,911	0,009	13,607	0,113
	60	1,212	0,012	14,854	0,146
	80	1,851	0,007	16,866	0,087
	100	2,438	0,015	19,520	0,186
Entisol roca fosfórica	0	0,000	0,000	0,000	0,000
	20	0,371	0,017	5,365	0,206
	40	0,761	0,012	10,486	0,149
	50	1,067	0,029	11,657	0,366
	60	1,336	0,012	13,298	0,155
	80	1,937	0,014	15,781	0,169
	100	2,618	0,019	17,275	0,241

ISOTERMA EN LA QUE SE VARIA LA DOSIS DE EMULSIÓN (EFECTO DOSIS)					
Suelo	Dosis de emulsión (T/ha)	Ceq (µgP/mL)	S _{ceq}	µg P _{adsorbido} / g suelo	S _{µg Padsorbido} / g suelo
Entisol roca fosfórica (EC)	0,00	0,745	0,010	15,685	0,120
	0,13	0,768	0,013	15,401	0,159
	0,25	0,771	0,026	15,359	0,324
	0,50	1,127	0,007	10,910	0,091
	1,00	1,111	0,004	11,108	0,056
	4,00	1,081	0,011	11,487	0,143
	6,00	0,999	0,019	12,514	0,243
Entisol roca fosfórica (EA)	0,00	0,746	0,011	15,673	0,137
	0,13	0,778	0,004	15,281	0,056
	0,25	0,780	0,005	15,248	0,064
	0,50	1,134	0,009	10,823	0,112
	1,00	1,117	0,003	11,034	0,036
	4,00	1,091	0,010	11,363	0,126
	6,00	1,009	0,012	12,390	0,150

Apéndice 2. Resultados para los ajustes lineales por el modelo de Langmuir.

ISOTERMA CONTROL				
Suelo	Dosis inicial de P ($\mu\text{g/g}$)	Ceq ($\mu\text{gP/mL}$)	X ($\mu\text{g P}_{\text{adsorbido}}$ / g suelo)	Ceq / X
Ultisol	0	0,000	0,000	0,00000
	20	0,000	10,000	0,00000
	40	0,002	19,979	0,00001
	50	0,005	24,941	0,00002
	60	0,008	29,898	0,00001
	80	0,014	39,830	0,00002
	100	0,044	49,447	0,00006
Entisol	0	0,022	0,000	0,000
	20	0,121	8,484	0,004
	40	0,262	16,726	0,004
	50	0,342	20,720	0,005
	60	0,446	24,431	0,008
	80	0,645	31,936	0,009
	100	0,934	38,322	0,010
Ultisol roca fosfórica	0	0,040	0,000	0,000
	20	0,118	8,524	0,014
	40	0,461	14,235	0,032
	50	0,763	15,461	0,049
	60	1,009	17,383	0,058
	80	1,555	20,557	0,076
	100	2,151	23,095	0,093
Entisol roca fosfórica	0	0,016	0,000	0,000
	20	0,202	7,480	0,001
	40	0,578	12,773	0,001
	50	0,846	14,430	0,003
	60	1,104	16,200	0,030
	80	1,592	20,096	0,043
	100	2,336	20,797	0,042

ISOTERMA EN LA QUE SE INCORPORA PRIMERAMENTE EL P Y LUEGO LA EMULSIÓN CATIÓNICA				
Suelo	Dosis inicial de P (µg/g)	Ceq (µgP/mL)	X (µg P _{adsorbido} / g suelo)	Ceq / X
Ultisol	0	0,000	0,000	0,00000
	20	0,000	10,000	0,00000
	40	0,003	19,962	0,00002
	50	0,006	24,919	0,00002
	60	0,010	29,871	0,00002
	80	0,016	39,800	0,00002
	100	0,043	49,467	0,00005
Entisol	0	0,000	0,000	0,000
	20	0,098	8,781	0,002
	40	0,256	16,799	0,003
	50	0,360	20,504	0,003
	60	0,473	24,089	0,008
	80	0,683	31,465	0,010
	100	0,976	37,797	0,010
Ultisol roca fosfórica	0	0,007	0,000	0,000
	20	0,110	8,623	0,013
	40	0,431	14,608	0,030
	50	0,726	15,926	0,046
	60	1,049	16,883	0,062
	80	1,613	19,834	0,081
	100	2,122	23,470	0,090
Entisol roca fosfórica	0	0,000	0,000	0,000
	20	0,098	7,009	0,000
	40	0,256	12,098	0,000
	50	0,360	14,421	0,003
	60	0,473	16,845	0,023
	80	0,683	19,811	0,047
	100	0,976	19,961	0,048

ISOTERMA EN LA QUE SE INCORPORA PRIMERAMENTE EL P Y LUEGO LA EMULSIÓN ANIÓNICA				
Suelo	Dosis inicial de P (µg/g)	Ceq (µgP/mL)	X (µg P _{adsorbido} / g suelo)	Ceq / X
Ultisol	0	0,000	0,000	0,00000
	20	0,000	10,000	0,00000
	40	0,005	19,943	0,00002
	50	0,007	24,910	0,00002
	60	0,009	29,890	0,00002
	80	0,018	39,781	0,00003
	100	0,039	49,514	0,00005
Entisol	0	0,001	0,000	0,000
	20	0,087	8,914	0,002
	40	0,284	16,452	0,005
	50	0,388	20,156	0,004
	60	0,464	24,199	0,010
	80	0,647	31,908	0,009
	100	0,963	37,969	0,010
Ultisol roca fosfórica	0	0,008	0,000	0,000
	20	0,161	7,985	0,020
	40	0,463	14,213	0,033
	50	0,770	15,379	0,050
	60	1,033	17,088	0,060
	80	1,581	20,237	0,078
	100	2,154	23,080	0,093
Entisol roca fosfórica	0	0,000	0,000	0,000
	20	0,208	7,399	0,000
	40	0,598	12,527	0,000
	50	0,874	14,074	0,003
	60	1,076	16,554	0,023
	80	1,615	19,811	0,047
	100	2,432	19,602	0,048

ISOTERMA EN LA QUE SE INCORPORA PRIMERAMENTE LA EMULSIÓN CATIÓNICA Y LUEGO EL P				
Suelo	Dosis inicial de P (µg/g)	Ceq (µgP/mL)	X (µg P _{adsorbido} / g suelo)	Ceq / X
Ultisol	0	0,000	0,000	0,00000
	20	0,003	9,957	0,00001
	40	0,010	19,876	0,00003
	50	0,013	24,833	0,00004
	60	0,020	29,752	0,00003
	80	0,035	39,562	0,00005
	100	0,058	49,276	0,00008
Entisol	0	0,000	0,000	0,000
	20	0,178	7,780	0,003
	40	0,473	14,084	0,006
	50	0,589	17,632	0,011
	60	0,687	21,417	0,014
	80	1,034	27,078	0,017
	100	1,549	30,642	0,018
Ultisol roca fosfórica	0	0,018	0,000	0,000
	20	0,323	5,966	0,054
	40	0,708	11,146	0,064
	50	1,027	12,159	0,084
	60	1,356	13,051	0,104
	80	1,850	16,879	0,110
	100	2,613	17,338	0,151
Entisol roca fosfórica	0	0,037	0,000	0,000
	20	0,466	4,180	0,042
	40	0,819	9,764	0,041
	50	1,072	11,602	0,050
	60	1,345	13,187	0,052
	80	1,902	16,220	0,049
	100	2,642	16,981	0,114

ISOTERMA EN LA QUE SE INCORPORA PRIMERAMENTE LA EMULSIÓN ANIÓNICA Y LUEGO EL P				
Suelo	Dosis inicial de P (µg/g)	Ceq (µgP/mL)	X (µg P _{adsorbido} / g suelo)	Ceq / X
Ultisol	0	0,000	0,000	0,00000
	20	0,002	9,971	0,00001
	40	0,012	19,852	0,00004
	50	0,016	24,805	0,00004
	60	0,021	29,743	0,00003
	80	0,035	39,562	0,00005
	100	0,064	49,195	0,00009
Entisol	0	0,012	0,000	0,000
	20	0,212	7,347	0,008
	40	0,491	13,861	0,008
	50	0,612	17,346	0,010
	60	0,730	20,869	0,016
	80	1,086	26,421	0,017
	100	1,549	30,642	0,020
Ultisol roca fosfórica	0	0,018	0,000	0,000
	20	0,323	6,604	0,041
	40	0,708	10,636	0,070
	50	1,027	11,664	0,091
	60	1,356	12,989	0,105
	80	1,850	16,695	0,112
	100	2,613	16,433	0,163
Entisol roca fosfórica	0	0,000	0,000	0,000
	20	0,427	4,661	0,042
	40	0,836	9,550	0,045
	50	1,100	11,254	0,047
	60	1,359	13,014	0,052
	80	1,934	15,830	0,049
	100	2,696	16,302	0,117

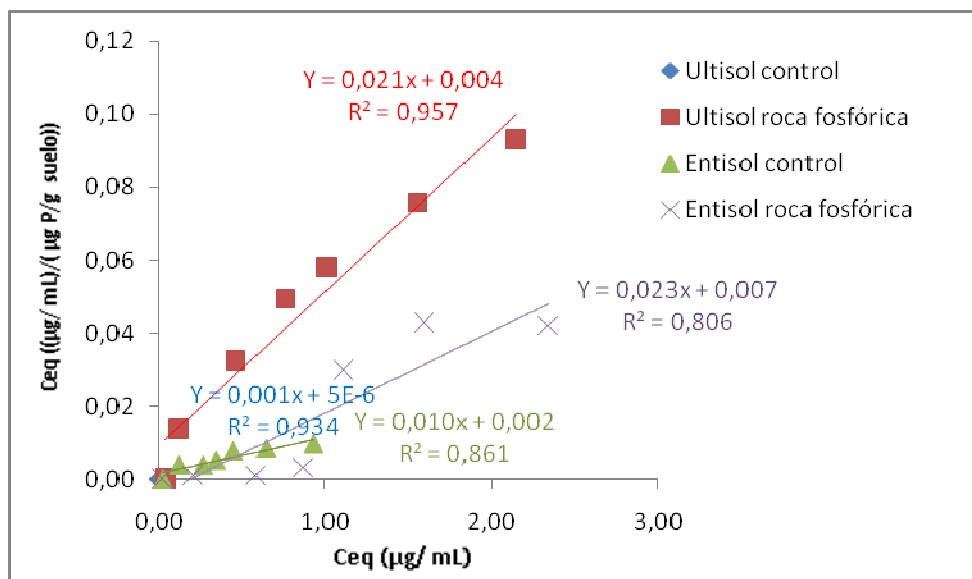
ISOTERMA EN LA QUE SE INCORPORA PRIMERAMENTE LA EMULSIÓN CATIONICA CON UN PERÍODO DE INCUBACIÓN DE 10 DÍAS Y LUEGO EL P				
Suelo	Dosis inicial de P ($\mu\text{g/g}$)	Ceq ($\mu\text{gP/mL}$)	X ($\mu\text{g P}_{\text{adsorbido}}$ / g suelo)	Ceq / X
Ultisol	0	0,000	0,000	0,00000
	20	0,009	9,892	0,00000
	40	0,022	19,722	0,00003
	50	0,031	24,609	0,00007
	60	0,042	29,477	0,00008
	80	0,066	39,180	0,00010
	100	0,101	48,737	0,00014
Entisol	0	0,000	0,000	0,00000
	20	0,315	6,061	0,00008
	40	0,658	11,774	0,00133
	50	0,789	15,135	0,00605
	60	0,904	18,702	0,00991
	80	1,218	24,773	0,01290
	100	1,496	31,296	0,01698
Ultisol roca fosfórica	0	0,002	0,000	0,00000
	20	0,473	4,087	0,03731
	40	0,995	7,567	0,04644
	50	1,280	8,999	0,06229
	60	1,611	9,865	0,05805
	80	2,156	13,051	0,07564
	100	2,662	16,722	0,09314
Entisol roca fosfórica	0	0,000	0,000	0,000
	20	0,534	3,329	0,034
	40	1,102	6,224	0,025
	50	1,401	7,493	0,030
	60	1,639	9,515	0,079
	80	2,242	11,974	0,145
	100	2,781	15,242	0,130

ISOTERMA EN LA QUE SE INCORPORA PRIMERAMENTE LA EMULSIÓN ANIÓNICA CON UN PERÍODO DE INCUBACIÓN DE 10 DÍAS Y LUEGO EL P				
Suelo	Dosis inicial de P (µg/g)	Ceq (µgP/mL)	X (µg P _{adsorbido} / g suelo)	Ceq / X
Ultisol	0	0,000	0,000	0,00000
	20	0,010	9,878	0,00004
	40	0,024	19,698	0,00007
	50	0,032	24,600	0,00007
	60	0,043	29,463	0,00008
	80	0,065	39,190	0,00010
	100	0,106	48,681	0,00015
Entisol	0	0,000	0,000	0,00000
	20	0,315	6,438	0,00016
	40	0,658	11,435	0,00283
	50	0,789	14,842	0,00533
	60	0,904	18,514	0,00931
	80	1,218	25,093	0,01564
	100	1,496	31,296	0,01818
Ultisol roca fosfórica	0	0,000	0,000	0,00000
	20	0,507	3,663	0,03422
	40	1,008	7,402	0,04047
	50	1,306	8,675	0,06327
	60	1,618	9,770	0,05704
	80	2,136	13,296	0,07781
	100	2,663	16,711	0,09325
Entisol roca fosfórica	0	0,000	0,000	0,000
	20	0,555	3,065	0,051
	40	1,122	5,979	0,026
	50	1,381	7,738	0,039
	60	1,616	9,798	0,082
	80	2,242	11,974	0,132
	100	2,752	15,596	0,138

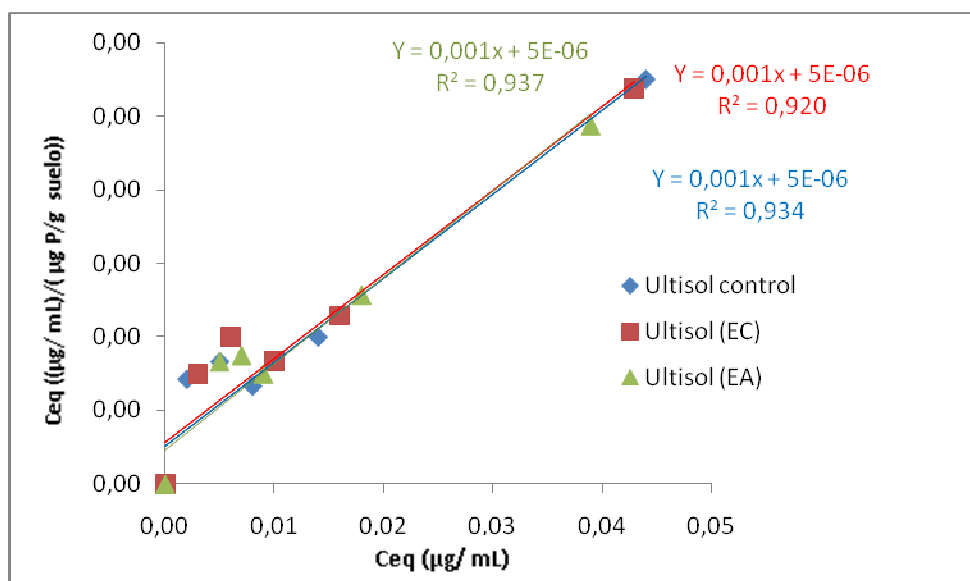
ISOTERMA EN LA QUE SE INCORPORA SIMULTÁNEAMENTE EL P Y LA EMULSIÓN CATIÓNICA				
Suelo	Dosis inicial de P (µg/g)	Ceq (µgP/mL)	X (µg P _{adsorbido} / g suelo)	Ceq / X
Ultisol	0	0,000	0,000	0,0000
	20	0,004	9,950	0,0000
	40	0,008	19,905	0,0000
	50	0,013	24,834	0,0000
	60	0,018	29,772	0,0000
	80	0,029	39,640	0,0000
	100	0,052	49,350	0,0001
Entisol	0	0,000	0,000	0,000
	20	0,285	7,885	0,002
	40	0,685	14,674	0,003
	50	0,813	18,411	0,009
	60	0,919	22,356	0,009
	80	1,193	28,586	0,011
	100	1,496	35,685	0,011
Ultisol roca fosfórica	0	0,000	0,000	0,000
	20	0,240	7,004	0,034
	40	0,630	12,120	0,052
	50	0,868	14,145	0,061
	60	1,181	15,241	0,077
	80	1,824	17,197	0,106
	100	2,447	19,416	0,126
Entisol roca fosfórica	0	0,047	0,000	0,000
	20	0,330	5,874	0,056
	40	0,726	10,920	0,066
	50	1,046	11,928	0,088
	60	1,346	13,180	0,102
	80	1,888	16,394	0,115
	100	2,578	17,771	0,145

ISOTERMA EN LA QUE SE INCORPORA SIMULTÁNEAMENTE EL P Y LA EMULSIÓN ANIÓNICA				
Suelo	Dosis inicial de P (µg/g)	Ceq (µgP/mL)	X (µg P _{adsorbido} / g suelo)	Ceq / X
Ultisol	0	0,000	0,000	0,00000
	20	0,004	9,954	0,00000
	40	0,009	19,884	0,00002
	50	0,015	24,814	0,00002
	60	0,018	29,777	0,00002
	80	0,030	39,623	0,00003
	100	0,049	49,392	0,00005
Entisol	0	0,016	0,000	0,000
	20	0,170	7,881	0,001
	40	0,392	15,100	0,003
	50	0,500	18,755	0,009
	60	0,630	22,124	0,009
	80	0,954	28,081	0,011
	100	1,165	35,432	0,011
Ultisol roca fosfórica	0	0,009	0,000	0,000
	20	0,285	6,433	0,044
	40	0,650	11,872	0,055
	50	0,911	13,607	0,067
	60	1,212	14,854	0,082
	80	1,851	16,866	0,110
	100	2,438	19,520	0,125
Entisol roca fosfórica	0	0,000	0,000	0,000
	20	0,371	5,365	0,069
	40	0,761	10,486	0,073
	50	1,067	11,657	0,092
	60	1,336	13,298	0,100
	80	1,937	15,781	0,123
	100	2,618	17,275	0,152

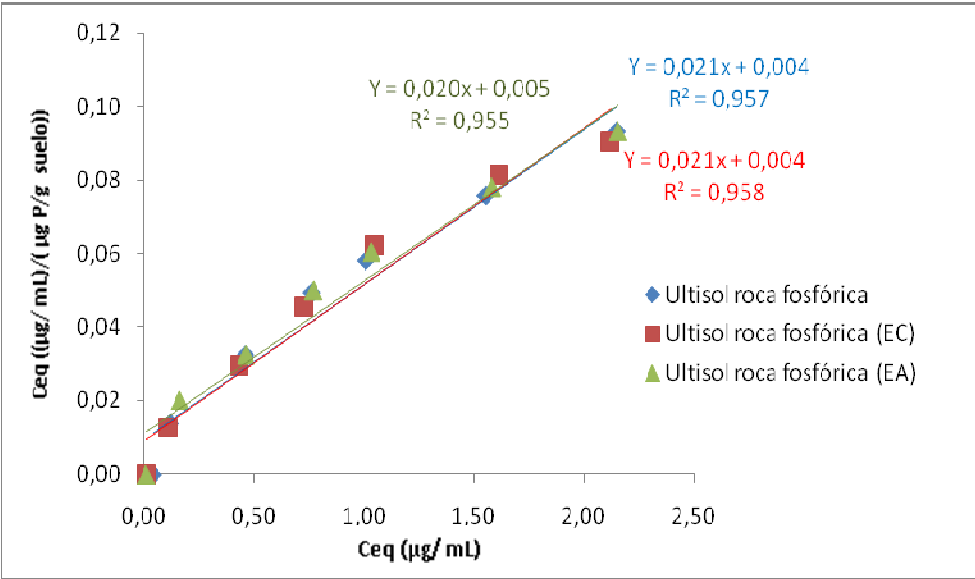
Apéndice 3. Isotermas de adsorción de fósforo para los suelos Ultisol y Entisol control, Ultisol y Entisol control roca fosfórica, ajustadas al modelo de Langmuir



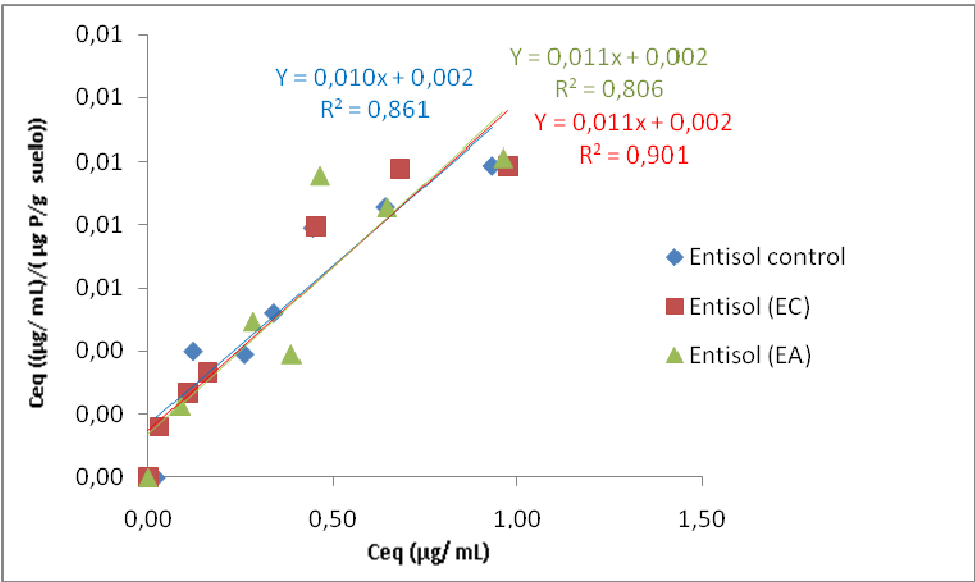
Apéndice 4. Isotermas de adsorción del Ultisol, cuando se aplica primero el P y luego la emulsión (catiónica y aniónica), ajustada al modelo de Langmuir



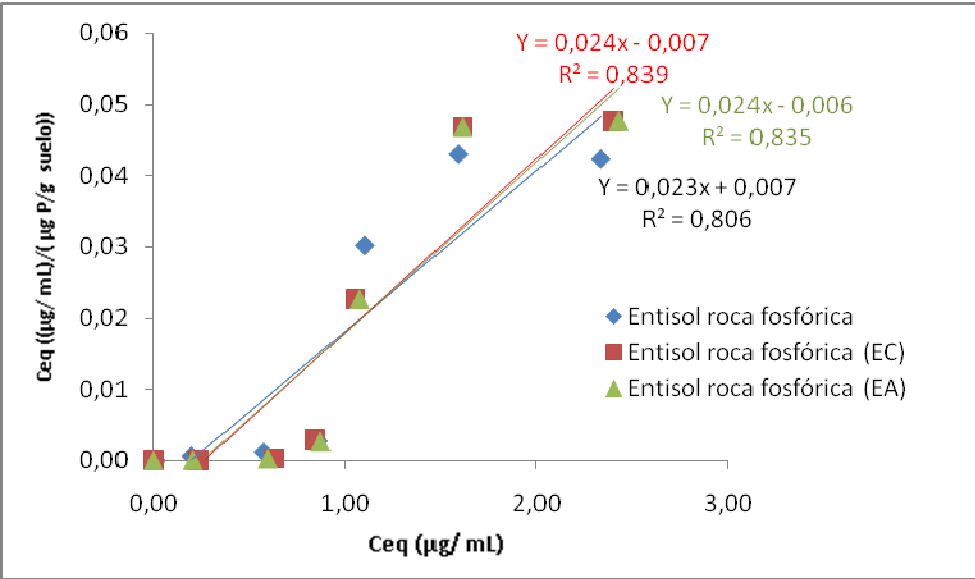
Apéndice 5. Isotermas de adsorción del Ultisol roca fosfórica, cuando se aplica primero el P y luego la emulsión (catiónica y aniónica), ajustada al modelo de Langmuir



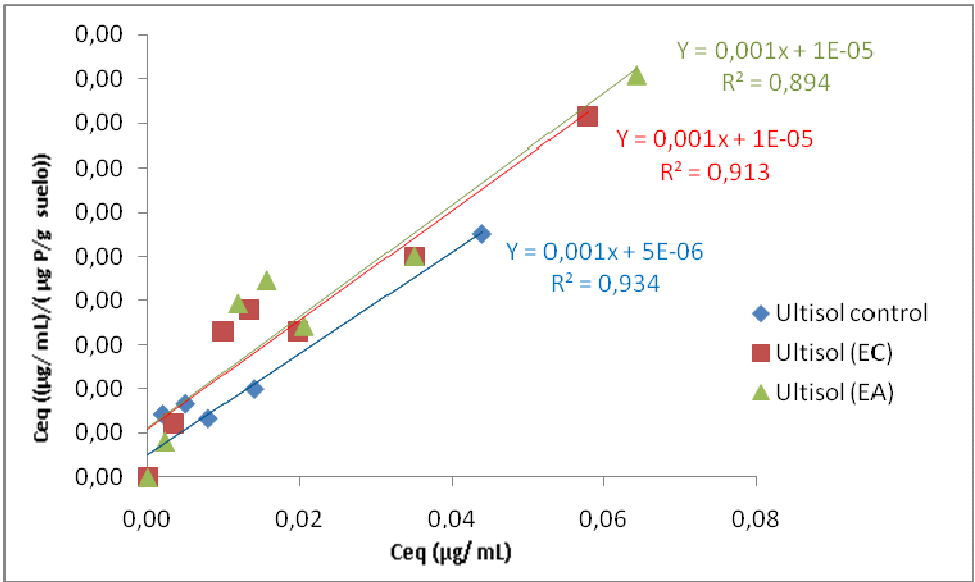
Apéndice 6. Isotermas de adsorción del Entisol, cuando se aplica primero el P y luego la emulsión (catiónica y aniónica), ajustada al modelo de Langmuir



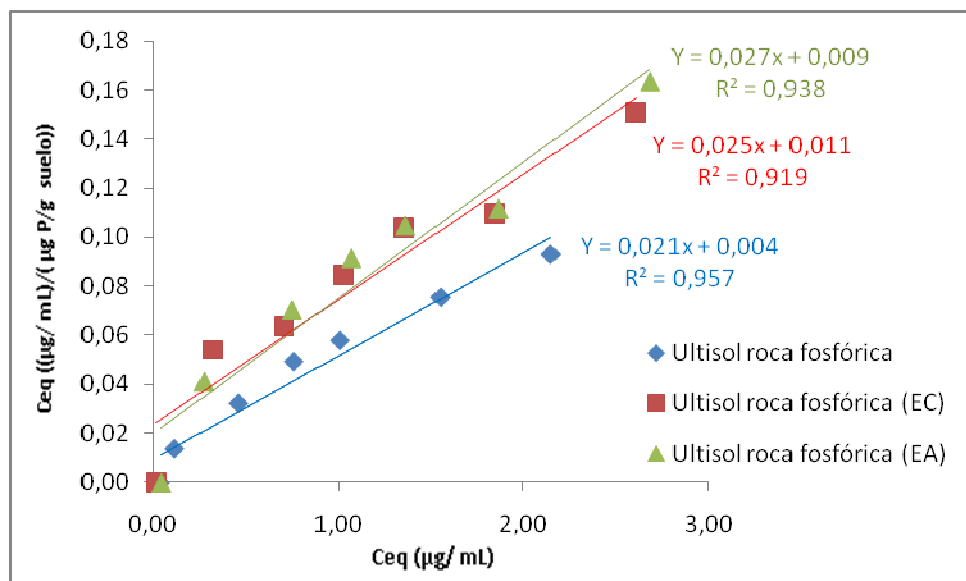
Apéndice 7. Isotermas de adsorción del Entisol roca fosfórica, cuando se aplica primero el P y luego la emulsión (catiónica y aniónica), ajustada al modelo de Langmuir



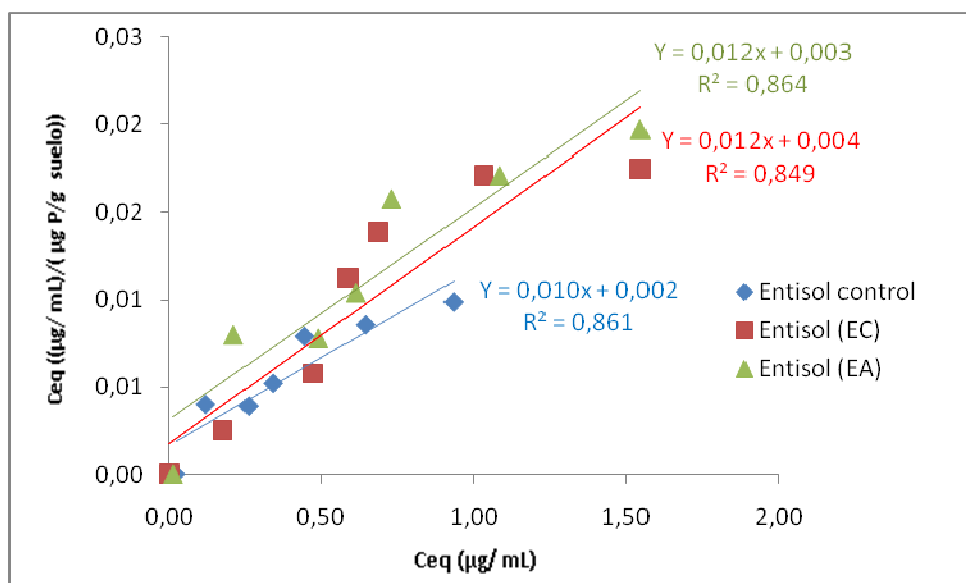
Apéndice 8. Isotermas de adsorción del Ultisol, cuando se aplica primero la emulsión (catiónica y aniónica) y luego el P, ajustada al modelo de Langmuir



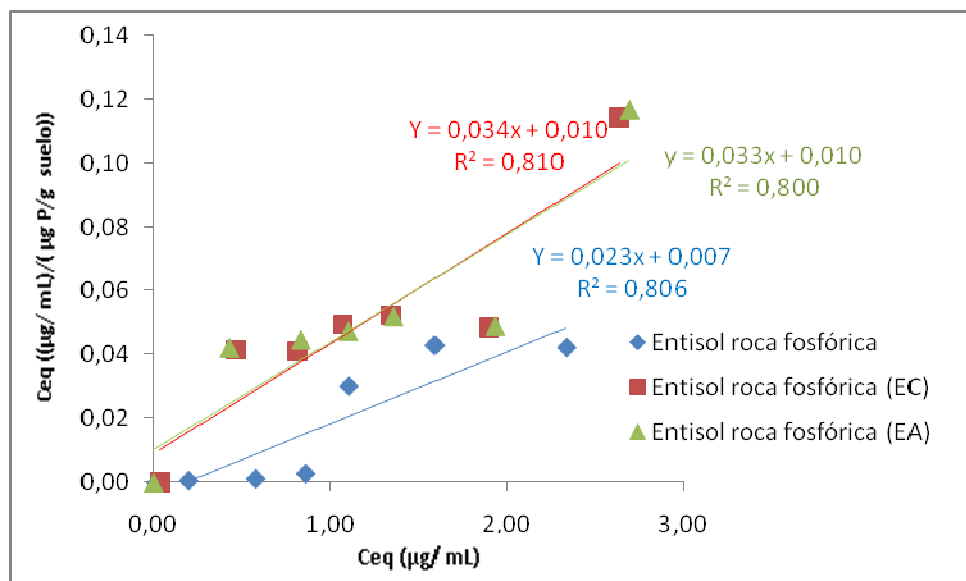
Apéndice 9. Isotermas de adsorción del Ultisol roca fosfórica, cuando se aplica primero la emulsión (catiónica y aniónica) y luego el P, ajustada al modelo de Langmuir



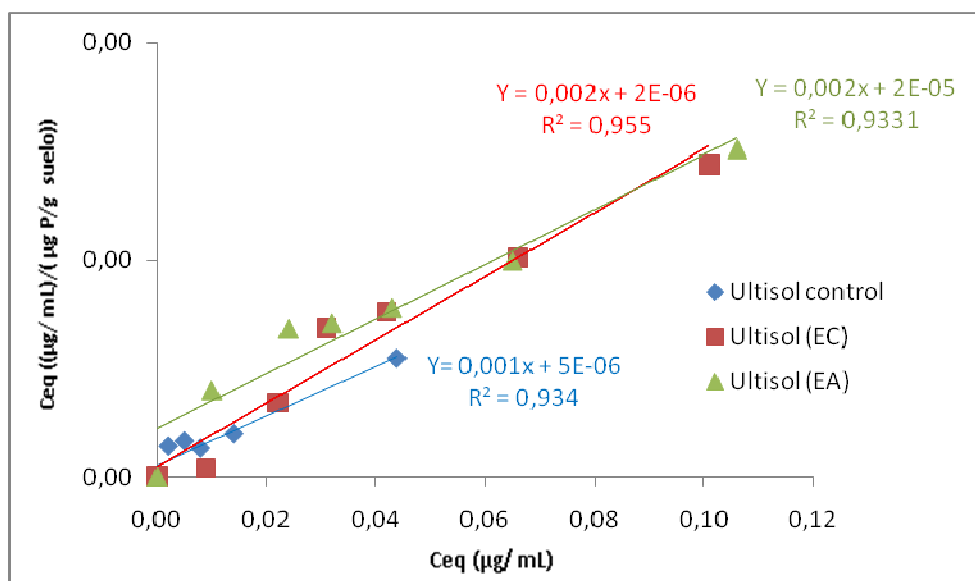
Apéndice 10. Isotermas de adsorción del Entisol, cuando se aplica primero la emulsión (catiónica y aniónica) y luego el P, ajustada al modelo de Langmuir



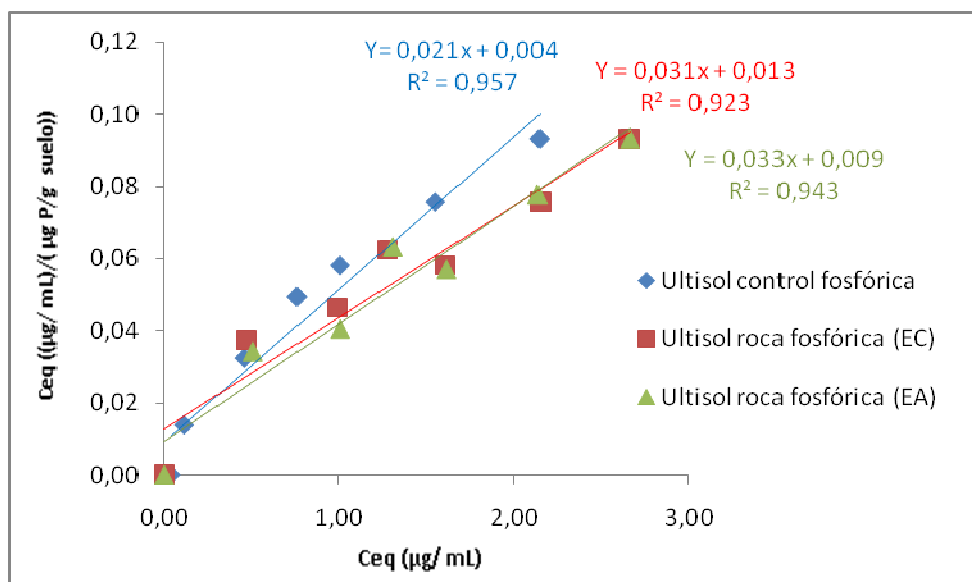
Apéndice 11. Isotermas de adsorción del Entisol roca fosfórica, cuando se aplica primero la emulsión (catiónica y aniónica) y luego el P, ajustada al modelo de Langmuir



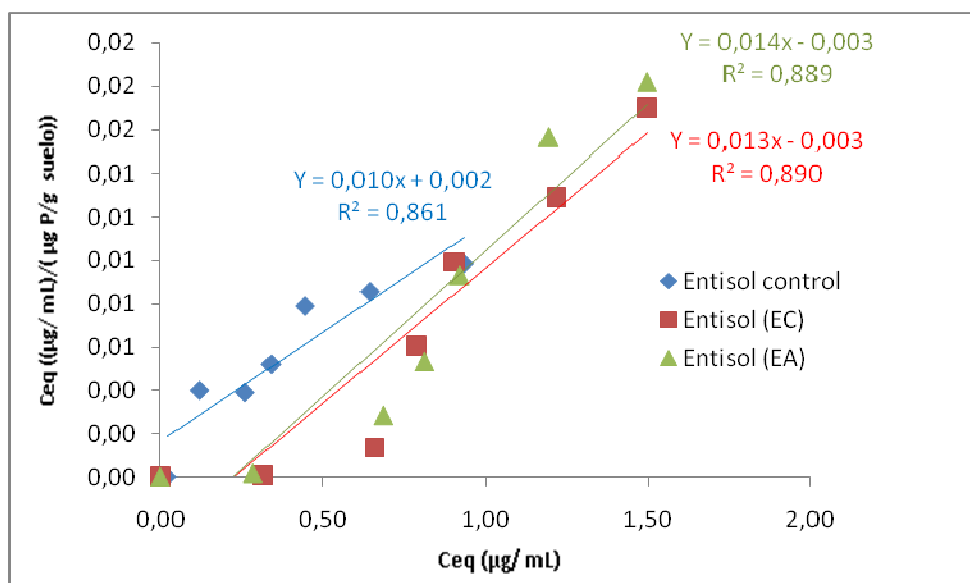
Apéndice 12. Isotermas de adsorción del Ultisol, cuando se aplica primero la emulsión con un período de incubación de 10 días y luego el P, ajustada al modelo de Langmuir



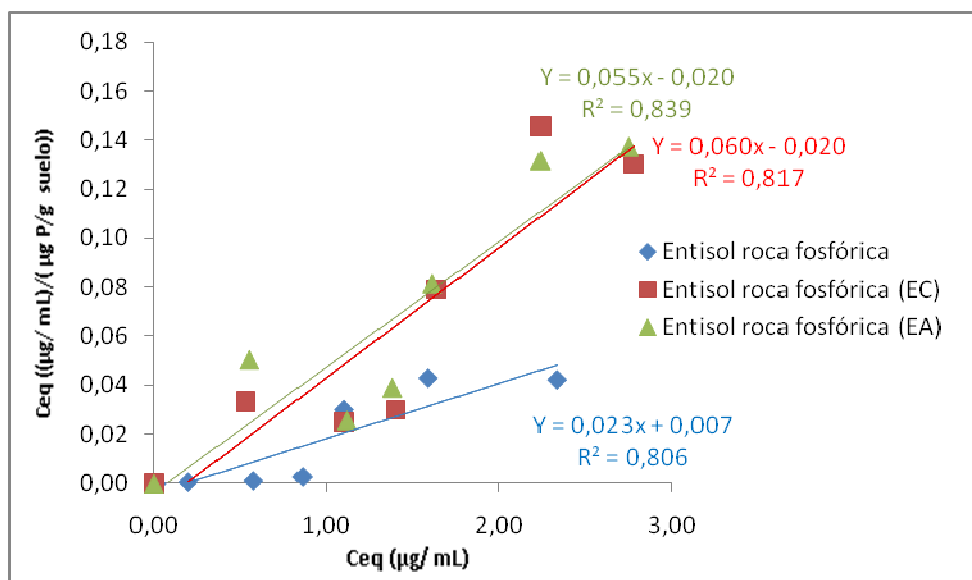
Apéndice 13. Isotermas de adsorción del Ultisol roca fosfórica, cuando se aplica primero la emulsión con un período de incubación de 10 días y luego el P, ajustada al modelo de Langmuir



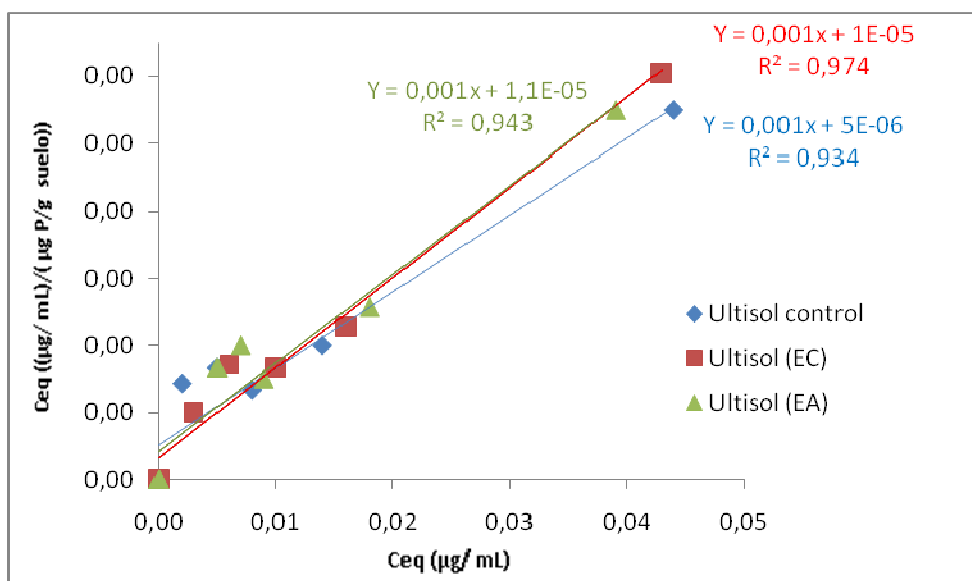
Apéndice 14. Isotermas de adsorción del Entisol, cuando se aplica primero la emulsión con un período de incubación de 10 días y luego el P, ajustada al modelo de Langmuir



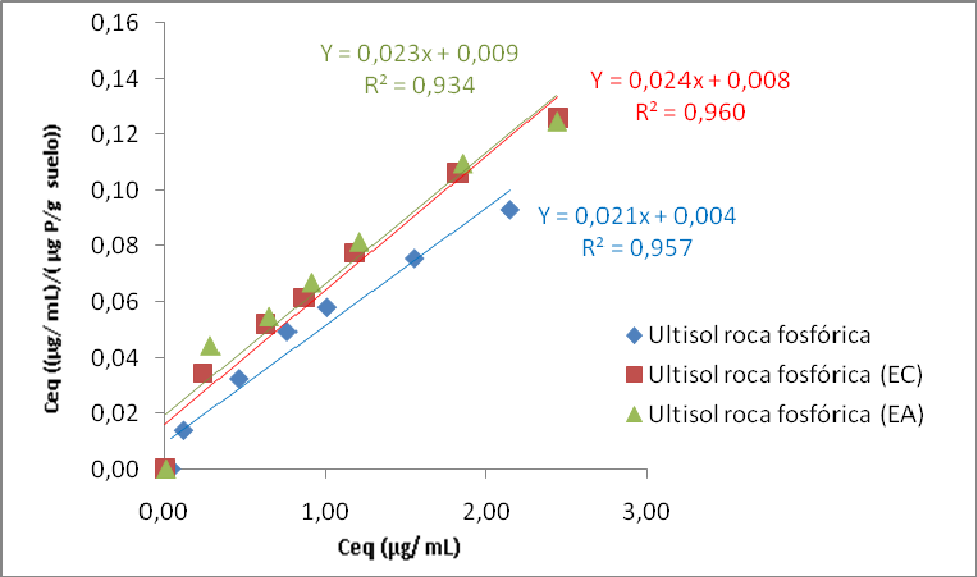
Apéndice 15. Isotermas de adsorción del Entisol roca fosfórica cuando se aplica primero la emulsión con un período de incubación de 10 días y luego el P, ajustada al modelo de Langmuir



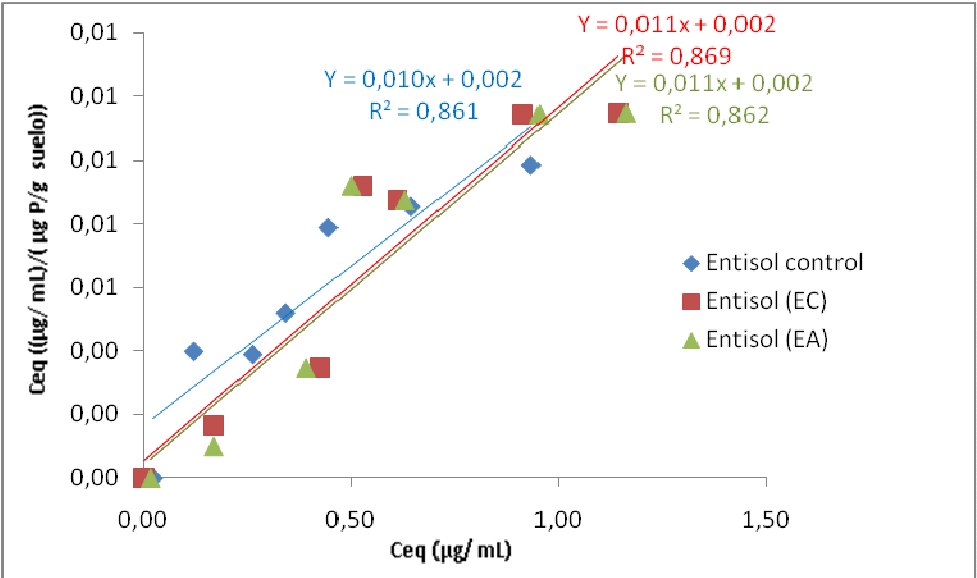
Apéndice 16. Isotermas de adsorción del Ultisol, cuando se aplica simultáneamente la emulsión (catiónica y aniónica) y el P, ajustada al modelo de Langmuir



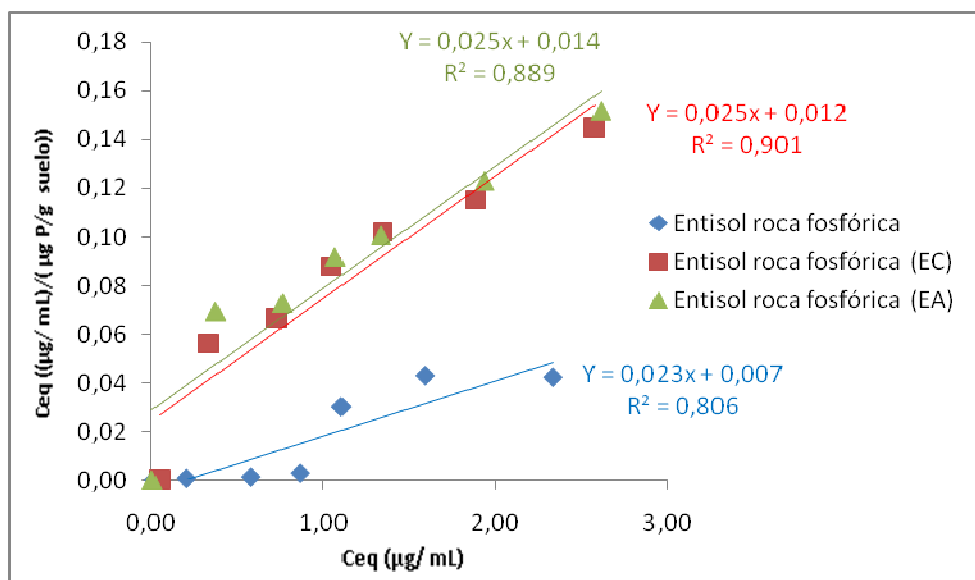
Apéndice 17. Isotermas de adsorción del Ultisol roca fosfórica, cuando se aplica simultáneamente la emulsión (catiónica y aniónica) y el P, ajustada al modelo de Langmuir



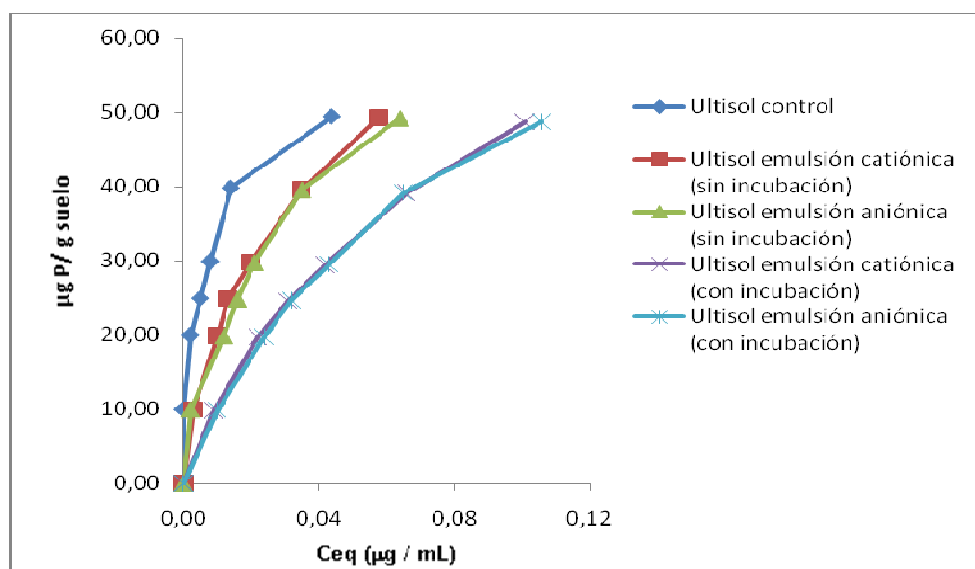
Apéndice 18. Isotermas de adsorción del Entisol, cuando se aplica simultáneamente la emulsión (catiónica y aniónica) y el P, ajustada al modelo de Langmuir



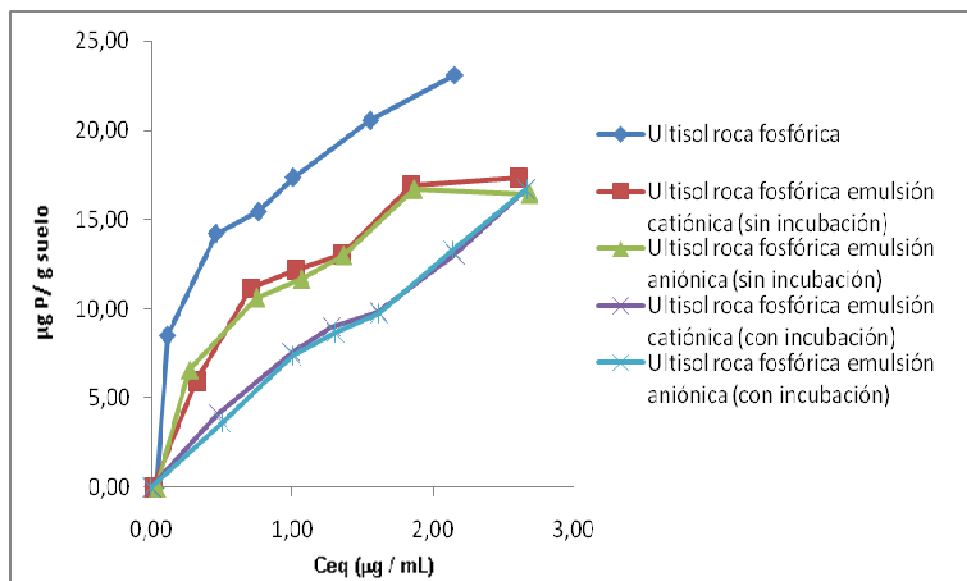
Apéndice 19. Isotermas de adsorción del Entisol roca fosfórica, cuando se aplica simultáneamente la emulsión (catiónica y aniónica) y el P, ajustada al modelo de Langmuir



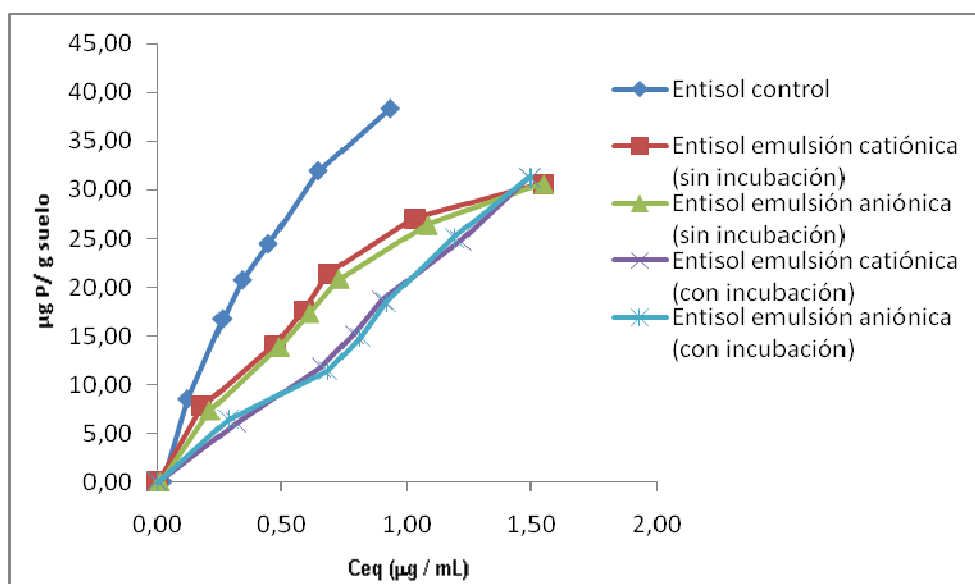
Apéndice 20. Isotermas en las que se aplica primero la emulsión (sin y con incubación) y luego el P, en el Ultisol



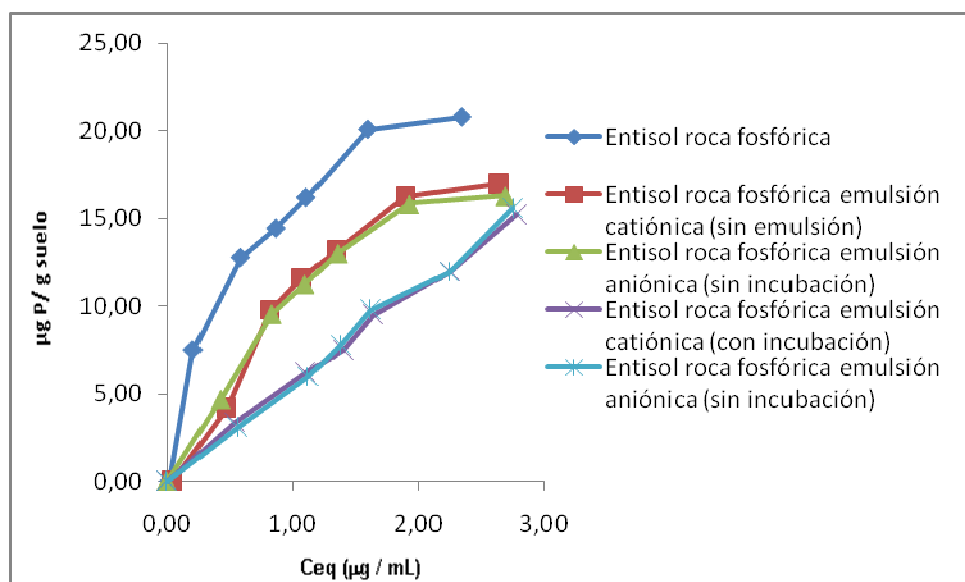
Apéndice 21. Isotermas en las que se aplica primero la emulsión (sin y con incubación) y luego el P, en el Ultisol roca fosfórica



Apéndice 22. Isotermas en las que se aplica primero la emulsión (sin y con incubación) y luego el P, en el Entisol



Apéndice 23. Isotermas en las que se aplica primero la emulsión (sin y con incubación) y luego el P, en el Entisol roca fosfórica



Apéndice 24. Resultados para los ajustes lineales por el modelo de Langmuir del efecto dosis

Suelo	Dosis para ambas emulsiones (Mg/ha)	Emulsión catiónica				Emulsión aniónica			
		$\mu\text{g P/ g suelo}$	$S_{\mu\text{g Padsorbido / g suelo}}$	$C_{eq} (\mu\text{g/ mL})$	$S_{C_{eq}}$	$\mu\text{g P/ g suelo}$	$S_{\mu\text{g Padsorbido / g suelo}}$	$C_{eq} (\mu\text{g/ mL})$	$S_{C_{eq}}$
Entisol control	0,00	15,685	0,120	0,745	0,010	15,673	0,137	0,746	0,011
	0,13	15,401	0,159	0,768	0,013	15,281	0,056	0,778	0,004
	0,25	15,359	0,324	0,771	0,026	15,248	0,064	0,780	0,005
	0,50	10,910	0,091	1,127	0,007	10,823	0,112	1,134	0,009
	1,00	11,108	0,056	1,111	0,004	11,034	0,036	1,117	0,003
	4,00	11,487	0,143	1,081	0,011	11,363	0,126	1,091	0,010
	6,70	12,514	0,243	0,999	0,019	12,390	0,150	1,009	0,012