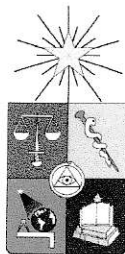


UCH-FC  
Q. Ambiental  
L533  
c.1



FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

**“IMPORTANCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA Y PRESENCIA DE ANIONES EN  
LA ADSORCIÓN DE CADMIO EN UN SUELO VOLCÁNICO CHILENO”**

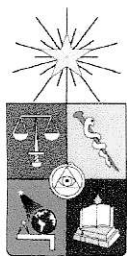
Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de:

**Químico Ambiental**

**Sebastián Ignacio Leiva Vicencio**

Director de Seminario de Título: Dra. Marcia Cazanga  
Profesor Patrocinante: Dr. Mauricio Isaacs

Noviembre de 2011  
Santiago – Chile  
**ESCUELA DE PREGRADO – FACULTAD DE CIENCIAS – UNIVERSIDAD DE CHILE**



## INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TITULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por el candidato:

### SEBASTIAN IGNACIO LEIVA VICENCIO

“IMPORTANCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA Y PRESENCIA DE ANIONES EN LA ADSORCIÓN DE CADMIO EN UN SUELO VOLCÁNICO CHILENO”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental

#### COMISIÓN DE EVALUACIÓN

*Dra. Marcia Cazanga*  
**Director Seminario de Título**

*Dr. Mauricio Isaacs*  
**Profesor Patrocinante**

*Dra. Marcela Urzúa*  
**Corrector**

*M. Cs. Sylvia Copaja Castillo*  
**Corrector**



Santiago de Chile, octubre de 2011

## RESEÑA



Ingresé a la carrera de Química Ambiental el año 2005, sin estar seguro de que fuera lo correcto, sólo sabiendo que tenía cierto gusto por la química y por las ciencias en general. Con el transcurso del tiempo fui pasando momentos y situaciones que me hacían dudar si continuar o desistir, pero comenzando con los ramos de carrera y dejando ya de lado los ramos de formación científica, comencé a encontrar el gusto por las ciencias ambientales, principalmente la vinculada al área de los suelos. Esto me llevó a desarrollar mi unidad de investigación en el Laboratorio de Cromatografía y Química Orgánica, realizando estudios sobre el comportamiento de fungicidas en el suelo, centrándose en su interacción con la materia orgánica y arcillas. Esta estadía en el laboratorio reafirmó mi interés por el área, lo que, junto al hecho de conocer gente maravillosa a lo largo de todo este proceso, me llevó a confirmar que la elección que había tomado al ingresar aquí era la correcta.

Para continuar con mi desarrollo científico y profesional, decidí desarrollar mi Seminario de Título en el Laboratorio de Suelos, perteneciente al Departamento de Química de los Materiales, de la Facultad de Química y Biología de la Universidad de Santiago de Chile, bajo el alelo de la Doctora Marcia Cazanga. En este lugar aprendí nuevos conocimientos y procedimientos en cuanto al tratamiento y análisis de suelos, además de contar siempre con el apoyo de los académicos y compañeros del laboratorio, lo que me permitió finalizar mi trabajo de mejor forma.

A futuro espero seguir por este rubro, poder aplicar los conocimientos y herramientas que se me entregaron durante todo este proceso, y ser un real aporte en lo que respecta a mejorar la calidad del medio ambiente en el país.



*A mis viejos, Sebastián y Laura,  
por su incondicional apoyo  
durante todo este proceso*

## Agradecimientos

A mis padres, por que a pesar de algunas discrepancias que existieron, les agradezco enormemente el soporte y apoyo que fueron durante estos años, en especial a ti viejo, por hacer siempre lo mejor para nosotros.

A todo el cuerpo académico de la facultad que me ayudo en esta tesis, a Marcela Urzúa y Mauricio Isaacs, por sus aportes, sugerencias y paciencia en las correcciones, y a la profesora Silvia Copaja, por que siempre tuvo la voluntad de ayudarme cuando necesitaba aclarar algún tema o ante cualquier consulta, por mínima que fuera, y por recibirme en su laboratorio para realizar mi unidad de investigación, que a larga me sirvió para introducirme en el área de los suelos.

De manera muy especial quiero agradecer a todo el equipo de trabajo del Laboratorio de Suelos de la Universidad de Santiago, partiendo por mi directora de seminario, Dra. Marcia Cazanga, por su tiempo y dedicación a este trabajo, por esos días que sin queja alguna, me acompañó hasta muy tarde para realizar medidas o discutir sobre lo avanzado, y por estar siempre disponible ante cualquier eventualidad, sin importar día ni hora. A los Doctores Carmen Pizarro, Juan Enrique Foster y Mauricio Escudey, por que siempre, a pesar de no tener ningún tipo de obligación con mi trabajo, tuvieron la disposición y buena voluntad de ser un real aporte ante mis dudas o problemas que surgieran, además de hacerme sentir siempre cómodo y bienvenido en su laboratorio. A los alumnos de doctorado, Karen, Nico y Marlén, por que siempre que requerí su ayuda, algún texto o programa, me facilitaron las cosas enormemente, en especial en la última parte de mi trabajo. Y a mis compañeros de laboratorio, por ese increíble ambiente de trabajo, por hacer más entretenido los quehaceres y más cortas las tardes.

Quiero agradecer a mis compañeros de carrera, a mis amigos con los que estuve desde el principio y a los que fui conociendo en el camino, por esos momentos inolvidables dentro y fuera de la universidad, por esos momentos de seriedad y estudio, pero más por esos de charlas y risas, en especial cuando el estudio se hacía insostenible.

Gracias a todos aquellos que de alguna manera me han ayudado en este proceso, directa o indirectamente. A mi tío Pedro y mi primo Pablo, por alojarme en su casa cuando lo necesité y guiarme en áreas que iban más allá de lo netamente académico. A mis compañeros de facultad, en especial a los de basquetball, por esos momentos que vivimos en la cancha y que nos servían para distraernos de todo el ajetreo universitario. A mis amigos Pato, Felipe, Loreto, Tomás y Chaparro, que, a pesar de las bromas, siempre entendieron cuando no podía verlos, y siempre estaban cuando los necesitaba.

Y gracias a ti Cami, por estar siempre ahí, por estar presente en cada paso de esta etapa, por hacer todo más fácil.

## INDICE DE CONTENIDOS

<b>RESUMEN</b> .....	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xvi</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Antecedentes Generales</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. Fundamento Teórico</b> .....	<b>5</b>
1.2.1. Suelos Volcánicos chilenos.....	5
1.2.2. Andisoles e Inceptisoles.....	8
1.2.3. Suelo Diguillín.....	9
1.2.4. Adsorción.....	11
1.2.4.1. Importancia de la Materia Orgánica en la adsorción.....	15
1.2.4.2. Otros factores determinantes en la adsorción.....	17
1.2.5. Modelos de Adsorción.....	18
1.2.5.1. Modelo de Freundlich.....	19
1.2.5.2. Modelo de Langmuir.....	20
1.2.6. Problemática Ambiental.....	22
1.3. Hipótesis.....	25
1.4. Objetivos.....	25
<b>II. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>27</b>
2.1. Selección de las muestras de Suelo.....	27
2.2. Caracterización del Suelo.....	27
2.3. Obtención de la Fracción Inorgánica del Suelo.....	30
2.4. Determinación del Fósforo disponible.....	31
2.5. Determinación del Punto Isoeléctrico (PIE).....	31

2.6. Cinética de Adsorción de Aniones y Cadmio.....	32
2.7. Isotermas de Adsorción.....	32
<b>III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>36</b>
3.1. Caracterización del Suelo.....	36
3.2. Caracterización de la Fracción Inorgánica.....	37
3.3. Determinación del Punto Isoeléctrico (PIE).....	38
3.4. Especiación de Aniones y Cadmio.....	40
3.5. Cinética de Adsorción.....	42
3.6. Isotermas de Adsorción.....	44
3.6.1. Isotermas de Adsorción de Fosfato, Arsenito y Molibdato.....	45
3.6.2. Isotermas de Adsorción de Cadmio.....	54
3.7. Ajustes Matemáticos de las Isotermas.....	61
<b>IV. CONCLUSIONES.....</b>	<b>65</b>
<b>V. REFERENCIAS.....</b>	<b>68</b>
<b>VI. ANEXOS.....</b>	<b>79</b>
6.1. ANEXO 1. Caracterización del Suelo Diguillín C-MO Y S-MO.....	80
6.2. ANEXO 2. Cinética de Adsorción.....	86
6.3. ANEXO 3. Isotermas de Adsorción.....	88



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de las isothermas de adsorción, según Sposito.....	13
Figura 2. Representación gráfica general del ajuste matemático de Freundlich.....	20
Figura 3. Representación gráfica general del ajuste matemático de Langmuir.....	22
Figura 4. Ubicación de la zona de muestreo.....	27
Figura 5. Diagrama de flujo protocolo de trabajo isothermas de adsorción de aniones en las matrices de suelo.....	34
Figura 6. Diagrama de flujo protocolo de trabajo isothermas de adsorción de Cadmio en las matrices de suelo.....	35
Figura 7. Curvas de potencial zeta vs pH para suelo Diguillín y su fracción inorgánica.....	39
Figura 8. Especiación del fosfato en función del pH.....	40
Figura 9. Especiación del arsenito en función del pH.....	41
Figura 10. Especiación del molibdato en función del pH.....	41
Figura 11. Especiación del cadmio en función del pH.....	42
Figura 12. Cinética de adsorción de los aniones Fosfato, Arsenito y Molibdato.....	43
Figura 13. Cinética de adsorción de Cadmio.....	44
Figura 14. Isothermas de adsorción del anión fosfato.....	45
Figura 15. Isothermas de adsorción del anión arsenito.....	46
Figura 16. Isothermas de adsorción del anión molibdato.....	46
Figura 17. Esquema de reacción para los aniones fosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) y arsenito ( $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$ ), con los ligandos $\text{OH}_2$ (a) y $\text{OH}$ (b) de la superficie de un óxido metálico.....	50
Figura 18. Efecto de la adsorción del anión fosfato sobre el pH del sobrenadante en el suelo Diguillín.....	53
Figura 19. Efecto de la adsorción del anión arsenito sobre el pH del sobrenadante en el suelo Diguillín.....	53
Figura 20. Efecto de la adsorción del anión molibdato sobre el pH del sobrenadante en el suelo Diguillín.....	54

Figura 21. Isotermas de adsorción de Cadmio sobre los suelos control.....	55
Figura 22. Isotherma de adsorción de Cadmio sobre los suelos tratados con fosfato.....	55
Figura 23. Isotherma de adsorción de Cadmio sobre los suelos tratados con arsenito.....	56
Figura 24. Isotherma de adsorción de Cadmio sobre los suelos tratados con molibdato.....	56
Figura 25. Esquema de reacción para el Cadmio con la superficie de los suelos.....	57
Figura 26. Efecto de la adsorción de cadmio sobre el pH del sobrenadante en las matrices de suelo Diguillín s-MO.....	58
Figura 27. Efecto de la adsorción de cadmio sobre el pH del sobrenadante en las matrices de suelo Diguillín c-MO.....	58
Figura 28. Isotermas de adsorción de Cadmio sobre el suelo s-MO.....	60
Figura 29. Isotermas de adsorción de Cadmio sobre el suelo c-MO.....	60
Figura 30. Curva de calibración de absorbancia en función de los mg de carbono.....	83
Figura 31. Curva de calibración de absorbancia en función del contenido de fósforo.....	84

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Países que poseen suelos derivados de cenizas volcánicos. Algunos ejemplos.....	2
Tabla 2. Distribución de los suelos derivados de materiales piroclásticos en la zona central y central-sur de Chile.....	7
Tabla 3. Ficha del Suelo Serie Diguillín.....	10
Tabla 4. Composición Mineralógica de los Suelos.....	11
Tabla 5. Características de la adsorción física y adsorción química.....	12
Tabla 6. Caracterización del suelo serie Diguillín.....	36
Tabla 7. Textura del suelo serie Diguillín.....	36
Tabla 8. Análisis Químico Total del suelo serie Diguillín.....	36
Tabla 9. Caracterización de la fracción inorgánica del suelo serie Diguillín.....	37
Tabla 10. PIE del suelo Diguillín y su fracción inorgánica.....	39
Tabla 11. Concentraciones ofrecidas, en el equilibrio y adsorbidas de fosfato en el suelo.....	47
Tabla 12. Concentraciones ofrecidas, en el equilibrio y adsorbidas de arsenito en el suelo Diguillín y su fracción inorgánica.....	48
Tabla 13. Concentraciones ofrecidas, en el equilibrio y adsorbidas de molibdato en el suelo Diguillín y su fracción inorgánica.....	48
Tabla 14. Fósforo disponible en ambas matrices de suelo.....	51
Tabla 15. Parámetros de Freundlich y Langmuir para las isotermas de adsorción de Aniones en suelo Diguillín.....	61
Tabla 16. Parámetros de Freundlich y Langmuir para las isotermas de adsorción de cadmio en Suelo Diguillín.....	63
Tabla 17. pH y CE de la muestra y duplicado del suelo c-MO.....	80
Tabla 18. pH y CE de la muestra y duplicado del suelo s-MO.....	80
Tabla 19. Porcentaje de Humedad (%) y Factor de Humedad (fh) de la muestra y duplicado del suelo c-MO.....	81

Tabla 20. Porcentaje de Humedad (%) y Factor de Humedad (fh) de la muestra y duplicado del suelo s-MO.....	81
Tabla 21. Absorbancia de la muestra y duplicado de las muestras de suelo c-MO.....	82
Tabla 22. Absorbancia y mg de carbono en el suelo c-MO.....	83
Tabla 23. Contenido de Fósforo en los suelos c-MO y s-MO.....	84
Tabla 24. Parámetros para determinar el PIE del Suelo c-MO.....	85
Tabla 25. Parámetros para determinar el PIE del Suelo s-MO.....	85
Tabla 26. Datos cinética de adsorción de fosfato.....	86
Tabla 27. Datos cinética de adsorción de arsenito.....	86
Tabla 28. Datos cinética de adsorción de molibdato.....	86
Tabla 29. Datos cinética de adsorción de cadmio.....	87
Tabla 30. Datos Isoterma de adsorción de fosfato en Suelo c-MO (muestra).....	88
Tabla 31. Datos Isoterma de adsorción de fosfato en Suelo c-MO (Duplicado).....	88
Tabla 32. Datos Isoterma de adsorción de fosfato en Suelo s-MO (muestra).....	89
Tabla 33. Datos Isoterma de adsorción de fosfato en Suelo s-MO (duplicado).....	89
Tabla 34. Datos Isoterma de adsorción de arsenito en Suelo c-MO (muestra).....	90
Tabla 35. Datos Isoterma de adsorción de arsenito en Suelo c-MO (duplicado).....	90
Tabla 36. Datos Isoterma de adsorción de arsenito en Suelo s-MO (muestra).....	91
Tabla 37. Datos Isoterma de adsorción de arsenito en Suelo s-MO (duplicado).....	91
Tabla 38. Datos Isoterma de adsorción de molibdato en Suelo c-MO (muestra).....	92
Tabla 39. Datos Isoterma de adsorción de molibdato en Suelo c-MO (duplicado).....	92
Tabla 40. Datos Isoterma de adsorción de molibdato en Suelo s-MO (muestra).....	93
Tabla 41. Datos Isoterma de adsorción de molibdato en Suelo s-MO (duplicado).....	93
Tabla 42. Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo c-MO control (muestra).....	94
Tabla 43. Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo c-MO control (duplicado).....	94

Tabla 44. Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo c-MO + fosfato (muestra).....	95
Tabla 45. Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo c-MO + fosfato (duplicado).....	95
Tabla 46. Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo c-MO + arsenito (muestra).....	96
Tabla 47. Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo c-MO + arsenito (duplicado).....	96
Tabla 48. Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo c-MO + molibdato (muestra).....	97
Tabla 49. Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo c-MO + molibdato (duplicado).....	97
Tabla 50. Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo s-MO control (muestra).....	98
Tabla 51. Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo s-MO control (duplicado).....	98
Tabla 52. Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo s-MO + fosfato (muestra).....	99
Tabla 53. Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo s-MO + fosfato (duplicado).....	99
Tabla 54. Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo s-MO + arsenito (muestra).....	100
Tabla 55. Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo s-MO + arsenito (duplicado).....	100
Tabla 56. Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo s-MO + molibdato (muestra).....	101
Tabla 57. Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo s-MO + molibdato (duplicado).....	101

## RESUMEN

Los metales pesados están inmersos dentro de un sistema reactivo gobernado por un conjunto de equilibrios que controlan las concentraciones de dichos metales en la fase denominada solución del suelo, pudiendo ser asimiladas por plantas, transportados a cuerpos de aguas superficiales o subterráneas, formar complejos estables y acumularse en el tiempo, o ser adsorbido por la superficie de manera intercambiable o no intercambiable. La presencia de algunos compuestos, generados de forma natural o introducidos en el sistema de manera antropogénica, suelen generar cambios en la reactividad de los suelos, alterando algunas de sus propiedades físico-químicas, como su capacidad de adsorción de especies metálicas. Esta situación suele darse con frecuencia en suelos destinados al desarrollo de actividades agrícolas, como los suelos derivados de material volcánico, los cuales son alterados mediante la adición de sustancias artificiales que generan un aumento de la producción agrícola, tal es el caso de fertilizantes, pesticidas o material de compostaje.

El presente trabajo tiene por objetivo estudiar el impacto que genera la presencia de materia orgánica y tres especies aniónicas (fosfato, arsenito y molibdato), en la adsorción del metal pesado cadmio ( $\text{Cd}^{+2}$ ), en un suelo volcánico chileno, serie Diguillín.

El estudio se realizó mediante la elaboración de isotermas de adsorción para el cadmio en presencia de los aniones mencionados, en sistemas monocomponente, para el suelo con y sin

materia orgánica, utilizando un sistema de Batch y trabajando a fuerza iónica constante, usando  $\text{KNO}_3$  0,5 M como solución equilibrante.

Los resultados indican que la presencia de los tres aniones en las matrices de suelo con y sin materia orgánica, favorecen la adsorción de cadmio, observando una mayor adsorción en el suelo tratado con fosfato, seguido del suelo tratado con arsenito y finalmente el tratado con molibdato. Además se observa un incremento en la adsorción de cadmio debido a la presencia de materia orgánica en el suelo, ya que los coeficientes de adsorción disminuyen en la fracción inorgánica de éste.

Los resultados de la adsorción de cadmio, así como de los aniones, fueron modelados adecuadamente por el modelo matemático de Langmuir, observándose coeficientes de correlación superior a 0,99 en todos los casos.

## ABSTRACT

The Heavy metals are immersed in a reactive system governed by a set of equilibria that control the concentrations of these metals in the soil solution phase, called soil solution, these can be absorbed by plants and transported to surface waters or groundwater form stable complexes and accumulate over time, two mechanisms can be occur: interchangeable or not interchangeable. The presence of some compounds are produced naturally or by the human activity, the overall result of their presence are the reactivity change of the soils, and the main effect are concerned with physical chemical properties and metallic adsorption capacity. There is a great concern with agricultural soils because these are being formed by volcanic material, which in order to improve their cultivable yield had been treated with natural and synthetic fertilizers, pesticides or compost.

The aim of this thesis is to study Organic Matter soil content impact on the anionic adsorption of phosphate, arsenite and molybdate, and how these species affect the adsorption of cadmium on a Chilean volcanic soil, Diguillin serie.

In order to achieve the objective, first the soil organic matter was eliminated by using hydrogen peroxide, secondly adsorption isotherms studies were carried out in a mono component system of cadmium on control soil and treated soil with phosphate, arsenite and molybdate anions. All the determination were done at constant ionic strength  $\text{KNO}_3$  (0,5M).



The results obtained indicate that anion previously adsorbed on control Diguillin soil and treated Diguillin soil favoured cadmium adsorption.

The experimental data obtained from the adsorption isotherms were modeled by using Langmuir model. All the correlation factors obtained are  $> 0.99$ .

The adsorption selectivity sequence is: Soil-phosphate  $>$  soil-arsenite  $>$  soil-molibdate. Furthermore, there is an increment on cadmium adsorption due to the organic matter content on soil. This fact can be explained with the lower adsorption coefficient of the inorganic fraction.

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes Generales

A nivel mundial, los suelos volcánicos están distribuidos en las regiones eruptivas recientes, preferentemente en las cercanías al círculo de actividad volcánica circumpacífico, y bajo condiciones ambientales muy diversas, encontrándose en países como Japón, Corea, Filipinas, Indonesia, Malasia, América Latina, África y Rusia, sumado a algunas islas oceánicas (Tabla 1). Según una evaluación efectuada por FAO/UNESCO, para el mapa mundial de suelos, solo los suelos de cenizas volcánicas (andosoles, lo que no incluye suelos formados a partir de vidrios o eyecciones volcánicas en regiones húmedas), ocupan un área cercana a los 110 millones de hectáreas, lo que se traduce en al menos un 1 por ciento de la superficie de la tierra (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007).

Los suelos derivados de cenizas volcánicas poseen una serie de propiedades muy particulares, como baja densidad aparente, carga variable, alta retención de agua, elevado contenido orgánico y alta fijación de fósforo entre otras, lo que los diferencia de suelos provenientes de otros materiales parentales. Estas propiedades se originan debido a la presencia dominante en la arcilla de un conjunto de minerales no-cristalinos y paracristalinos, lo que condiciona su comportamiento y utilización agrícola (Besoain, 1985)

**Tabla 1.** Países que poseen suelos derivados de cenizas volcánicas. Algunos ejemplos (Adaptada de Besoain, 1985).

Lugar	Tipo de Suelo	Material Parental	Minerales de arcilla	Edad	Clima
<b>Zona Tropical y Subtropical</b>					
Ecuador - Colombia	Andosol	Cenizas andecíticas	Alofán, imogolita, haloisita	Reciente	Tropical-Subtropical
El Salvador – Costa Rica	Andosoles, Typic Distrandedept	Cenizas volcánicas	Alofán, gibbsita, haloisita	Reciente	Tropical húmedo
México	Durandepts, Mollandepts y Vitrandepts	Cenizas basálticas, andesíticas, riódacíticas, dacíticas	Alofán, caolinita, mica, montmorillonita, vermiculita	Cuaternario	Tropical, subtropical, templado, frío
Kenia	Suelos volcánicos	Vulcanitas alcalinas; cenizas	Componentes amorfo-clorita	Cuaternario	Tropical Húmedo
Indonesia	Andosoles y transición andosol-latosol	Cenizas y toba basáltica	Alofán, haloisita	Pleistoceno a reciente	Tropical lluvioso a frío húmedo de montaña
Hawái	Dystranddepts, Hydrandepts, Mollandepts, etc.	Cenizas y lavas andesíticas, freáticas	Alofán, caolín, gibbsita, vermiculita	Pleistoceno a reciente	Tropical semidesértico, tropical lluvioso
<b>Zona Templada a Templada Fría</b>					
Japón	Andepts	Piroclásticas, basálticas, andesíticas y riolíticas	Alofán, imogolita, gibbsita, clorita	Principalmente holocena	Continental a permanente húmedo con verano cálido
Nueva Zelanda	Andosoles	Cenizas andesíticas, riolíticas, basálticas	Alofán, imogolita, gibbsita	Holoceno a reciente	Permanentemente húmedo, con verano seco
Chile - Argentina	Andosoles, Andepts	Cenizas andesíticas/ Basálticas	Alofán, imogolita, gibbsita	Holoceno	Mediterráneo
<b>Zona polar y subpolar</b>					
Estados Unidos	Cryandepts	Cenizas volcánicas básicas y riódacíticas	Alofán	Reciente (erupción de 1912)	Subpolar, fuertemente oceánico
Rusia	Suelos Pardos	Cenizas andesíticas-andesítico/basálticas	Alofán, haloisita, vermiculita, gibbsita	Holoceno a reciente	Continental boreal

En Chile, hasta fines de la década del 70, se estimaba que los suelos derivados de material volcánico representaban entre un 50-60% de un total de 5.400.000 hectáreas de suelo arable (Peralta, 1978). En la actualidad los suelos chilenos derivados de cenizas volcánicas, representan más de un 70 % de la superficie del país destinada al desarrollo de actividades del tipo silvoagropecuarias (INE, 1998), razón por la cual existe un alto grado de interés en su estudio desde el punto de vista productivo, así como de los fenómenos biológicos, físicos y químicos que ocurren en ellos. Éstos suelos, principalmente los desarrollados en la zona centro-sur del país, se caracterizan por provenir de materiales piroclásticos, donde diversos factores, como un irregular relieve, una rica red fluvial, las glaciaciones del Pleistoceno, la proximidad a volcanes, fuertes vientos y el encajonamiento del valle central, han influido en la depositación de cenizas, generando una amplia tipología de suelos (Besoain & Sepúlveda, 1985).

Sólo entre las regiones Metropolitana y IX, la superficie cubierta por suelos de origen volcánico corresponde a 5288 km<sup>2</sup>, siendo la gran mayoría (62%) suelos de orden Andisol (Mella & Kuhne, 1985), y presentándose en menor cantidad suelos correspondientes a los órdenes Inceptisoles, Alfisoles, Ultisoles y Entisoles, entre otros. Estos suelos se diferencian del resto de las superficies del país por los materiales que los constituyen, los cuales ejercen una clara influencia sobre las propiedades de intercambio, determinando así las interacciones entre compuestos orgánicos e inorgánicos y las especies en solución, lo que condiciona sus propiedades agronómicas.

La carga superficial de los suelos se genera en sus componentes orgánicos e inorgánicos, donde las fuentes de carga superficial inorgánica incluyen minerales de bajo y alto grado de cristalinidad con carga permanente (White y Zelazny, 1986), particularmente en suelos derivados de cenizas volcánicas con carga variable. Por otro lado, la fuente de carga superficial orgánica está constituida por la materia orgánica, específicamente por grupos funcionales de los compuestos húmicos presentes, y por los complejos de Al y Fe con humus que presentan superficie anfótera.

La serie de propiedades de los suelos derivados de material volcánico han permitido que sean utilizados como una excelente superficie para llevar a cabo actividades de tipo silvoagropecuarias, razón por la cual el correcto manejo de ellos es vital para no provocar problemáticas ambientales que afecten el recurso suelo. Una de estas problemáticas es la depositación y acumulación de elementos contaminantes, como metales pesados, los cuales presentan un nivel de retención, transporte y/o acumulación dependiente de la naturaleza, abundancia y especiación de las fracciones inorgánicas y orgánicas del suelo, así como de la presencia de otras especies que generen cambios en la reactividad superficial del mismo. Es por esto que en Chile, la CONAMA propuso un Anteproyecto de Reglamento para el uso de residuos no peligrosos en suelos agrícolas, en el año 2004, el cual, basado en la experiencia extranjera, estableció una concentración máxima permitida de cadmio, y otros metales pesados, en suelos agrícolas (2 mg/kg de suelo, en macrozona sur, a  $\text{pH} > 5$ , para el cadmio) (Informe, Criterios de Calidad de Suelo Agrícola, 2005).

## **1.2. Fundamento Teórico**

### **1.2.1. Suelos Volcánicos Chilenos**

Las cenizas volcánicas se definen como un material piroclásticos, de naturaleza pulverulenta, y cuyo tamaño varía desde el polvo impalpable hasta el límite de las arenas (< 2 mm), y están constituidas principalmente por vidrios (Besoain, 1985). La formación de los suelos volcánicos está subordinada a la existencia de vidrio volcánico, y a una elevada superficie de contacto, además de una condición de drenaje libre, un nivel mínimo de precipitación anual (en Chile están situado alrededor de 800 mm), y un periodo de tiempo que usualmente no excede los 25.000 años, a pesar de que también pueden ser originados a partir de otros materiales piroclásticos que no correspondan a cenizas, como pómez, escorias básicas vesiculares, tobas, basalto y aglomerados volcánicos (Birrel, 1964).

La naturaleza química de los suelos volcánicos incide en sus propiedades químicas, físicas y biológicas, las que determinan las interacciones entre compuestos orgánicos e inorgánicos y las especies en solución, condicionando fuertemente sus propiedades agronómicas. Estos suelos están dominados por minerales de bajo grado de cristalinidad que poseen carga variable o dependiente del pH, presentan estructuras bien definidas, altos contenidos de materia orgánica (en diferentes grados de humificación), alta retención de humedad, capacidad de intercambio catiónico, acidez potencial, baja densidad aparente y baja relación  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  (Wada, 1985; Dahlgren y col., 2004).

Los suelos volcánicos de Chile están constituidos mayoritariamente por Andisoles (identificados con el nombre vernáculo de “Trumaos”), los cuales debido a la superficie arable que representan han sido históricamente sometidos a un uso intensivo, y en menor grado por Ultisoles (conocidos como “Rojos Arcillosos”) (Tabla 2). Existen también áreas menores de suelos volcánicos pertenecientes a los órdenes Inceptisoles, Entisoles y Alfisoles (Mella y Kühne, 1985). Los suelos Trumaos se encuentran entre los 35° y 44° S y son suelos jóvenes, permeables, friables, no plásticos; tixotrópicos, de textura franca, franco limosa o franco arcillosa, de colores pardo amarillento a pardo oscuro, altos en materia orgánica, de pH moderadamente ácido (5,6-6,0), poseen coloides de carga variable con elevada capacidad de retención de agua y de fosfatos. La reactividad química está determinada especialmente por la presencia de Al activo, el cual puede presentarse en varias formas: aluminosilicatos de rango corto como alófana e imogolita; iones hidroxil-Al en silicatos de capas 2:1 y 2:2; complejos Al-húmicos; y Al(III) de intercambio en silicatos de capas (Sadzawka y Porte, 1985; Besoain, 1999). Los suelos Rojo Arcillosos se encuentran entre los 36° y 44° S y son suelos más antiguos, profundos, arcillosos, de pH fuertemente ácido (5,1-5,5), de difícil laboreo. Poseen carga variable alta, especialmente en los horizontes superficiales, atribuible a coloides orgánicos ya que en sus arcillas predomina la haloisita-0,7 nm (Besoain, 1985; Luzio y col., 2003).

**Tabla 2.** Distribución de los suelos derivados de materiales piroclásticos en la zona central y central-sur de Chile (Besoain, 1985).

<b>Zona Climática</b>	<b>Suelos</b>	<b>Fisiografía</b>	<b>Material Parental</b>	<b>Tipo de Suelo</b>	<b>Serie Representativa</b>	
De transición semiárida/mediterránea	Pumicíticos	Depresión Central	Cenizas riolíticas pumicíticas	Xeric Durandepts	Pudahuel	
Húmeda a Subhúmeda	Trumaos	Cordillera Andina	Cenizas basáltico-andesíticas, y pómez dasítica, escoria	Typic Vitrandepts	Ralún	
		Precordillera Andina	Cenizas Basáltico-andesíticas	Entic Vitrandepts	Los Prados	
		Depresión Central	Cenizas Basáltico-andesíticas	Typic Distrandepts	Arrayán	
		Cordillera de la Costa	Cenizas Basáltico-andesíticas	Typic Hydrandepts	Lastarria	
	Ñadis	Depresión Central	Cenizas Basáltico-andesíticas	Typic Placandepts	Alerce	
	Pardo Arcillosos	Depresión Central	Cenizas Básicas	Andic Haplumbrepts	Perquenco	
	Rojo Arcillosos	Precordillera de los Andes y de la Cordillera de la Costa: Depresión Central		Cenizas Volcánicas Básicas	Typic Rhodustults	Collipulli
					Andeptic Haplohumults	Crucero
	De Arenas Volcánicas	Depresión Central		Arenas Basálticas y Andesíticas	Dystric Xeropsamments	Arenales
		Cordillera Andina		Arenas Basáltico-andesítica	Andic Haplumbrept	Caburga



### 1.2.2. Andisoles e Inceptisoles

Ambos órdenes de suelo presentan características similares en cuanto a su productividad y algunas propiedades físicas y químicas, tal es el caso del contenido de material orgánico y mineralogía. Sin embargo, existen algunas características que los diferencian entre sí, lo que genera que algunas series de suelo sean incluidas dentro de uno de los dos órdenes, a pesar de poseer un comportamiento, frente a determinadas condiciones y fenómenos, que encaja dentro de ambas descripciones.

El desarrollo de los Andisoles comprende un conjunto de procesos definidos como andosolización, caracterizados por Ugolini y otros investigadores, como la acumulación de Fe y Al, debido a una meteorización rápida, y carbono orgánico disuelto, en el horizonte A, con poco lavado de estos componentes hacia el horizonte B, cuya formación está dominada por procesos de meteorización *in situ* (Shoji y col, 1993). Este orden de suelos se desarrolla en eyecciones o vidrios volcánicos bajo casi cualquier clima (excepto bajo condiciones climáticas hiperáridas). Sin embargo también pueden desarrollarse en otros materiales ricos en silicatos bajo meteorización ácida en climas húmedo y perhúmedo (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007). Presentan una alta productividad natural y se caracterizan por presentar una mineralogía dominada por minerales de corto rango de ordenamiento, como imogolita y alofán. Generalmente presentan una textura franco arenosa (USDA, 2006).

El orden Inceptisol incluye suelos de regiones húmedas y subhúmedas, que presentan bajas temperaturas y un alto contenido de materia orgánica. Debido a las bajas

temperaturas, esta materia orgánica presenta bajo grado de descomposición. Se caracterizan por presentar un pH levemente ácido, una fertilidad variable y un drenaje medio. Se consideran suelos volcánicos recientes, clasificándose como una etapa joven de futuros ultisoles u oxisoles. Su mineralogía está gobernada por minerales de tipo amorfos y semicristalinos (USDA, 2006).

### **1.2.3. Suelo Diguillín**

El suelo Diguillín corresponde a una serie perteneciente a la familia Arrayan, caracterizada por ser derivado de cenizas volcánicas modernas y estar ubicado en la parte central de la depresión intermedia entre las regiones VII y VIII, a una altura entre los 120 y 180 m.s.n.m (Tabla 3). Es un suelo profundo (menor que los otros suelos miembros de esta familia), de textura media, drenaje moderado-bueno, color pardo muy oscuro en la superficie y pardo amarillento oscuro a pardo amarillento en profundidad, dentro del tono 10YR. Su substratum está constituido por toba volcánica. Se caracteriza por presentar un elevado contenido de material orgánico, una topografía plana a suavemente ondulada, y un contenido de arcilla importante (Mella y Kuhne, 1985).

Muchos investigadores han clasificado este suelo dentro del orden Andisol, ya que posee propiedades acordes a éste, pero en las últimas investigaciones realizadas por Escudey y col. (2010), se ha determinado que su densidad aparente corresponde a la de un Inceptisol (mayor a 1 g/mL) y no a la de un Andisol (menor a 1 g/mL), a pesar de presentar una reactividad muy similar a la de éste último orden.

**Tabla 3.** Ficha del Suelo Serie Diguillín (Adaptado de Mella y Kuhne, 1985)

Familia	Arrayán
Serie	Diguillín
Clasificación	Medial, thermic, Typic Dystrandeps
Ubicación	A 1.200 m al sur de Pueblo Seco
Fisiografía	Depresión Intermedia
Topografía	Plana a suavemente ondulada
Drenaje	Moderado-Bueno
Vegetación	Estepa Acacia cavenia
Temperatura del Suelo	Media anual 15,5 °C; Verano 19,3 °C
Régimen de Temperatura	Térmico
Pluviometría	Anual 1.200-1.500 mm; Otoño 300-400 mm; Invierno 500-700 mm; Primavera 200-250 mm; Verano 70-100 mm
Régimen de Humedad	Xérico
Material Parental	Cenizas volcánicas modernas

El horizonte A (0-17 cm de profundidad) se caracteriza por ser de color pardo muy oscuro (10YR 3/2) en seco; franca; plástico y adhesivo; friable en húmedo y blando en seco. Presenta raíces finas abundantes y medias comunes; poros finos y muy finos, abundantes; crototivas escasas. Límite lineal, claro (Mella y Kuhne, 1985). Se destaca la presencia de alofán, complejos órgano-alofánicos y feldespato (Cazanga y col., 2009).

La mineralogía del suelo Diguillín (Tabla 4), está dominada principalmente por minerales y aluminosilicatos de tipo amorfos y paracristalinos, lo que indica que la composición mineralógica de las arcillas es variable y dependiente del estado de formación del suelo, del horizonte, de la naturaleza petrológica de las cenizas parentales, del espesor de los depósitos de cenizas y otros factores (Wada, 1980). También se señala que la formación y transformación de los minerales de arcilla por alteración de las

cenizas volcánicas y pómez son profundamente afectadas por la acumulación del humus (complejos Al, Fe-humus).

**Tabla 4.** Composición Mineralógica del Suelo Diguillín (Adaptado de Escudey y col., 2001.)

<b>Mineral</b>	<b>Proporción</b>
Alofán	+++++
A-Cristobalita	-
Clorito-Al	-
Ferrihidrita	+
Haloisita	++
Montmorillonita	-
Órgano-alofán	+
Plagioclasa	++
Vermiculita	+

(+++++ Dominante (>50%), ++++ Abundante (20-50%), +++ Común (5-20%), ++ Presente (1-5%), + Fracción Traza (<1%), - No se presenta (0%))

#### 1.2.4. Adsorción

El proceso de adsorción corresponde a un fenómeno mediante el cual se extrae una especie desde una fase y se concentra sobre la superficie de otra, generalmente una fase sólida (Fassbender y Bornemisza, 1987). Este proceso, en suelos, se atribuye a las interacciones entre la superficie activa de las partículas sólidas y el adsorbato (especie química presente en la solución suelo).

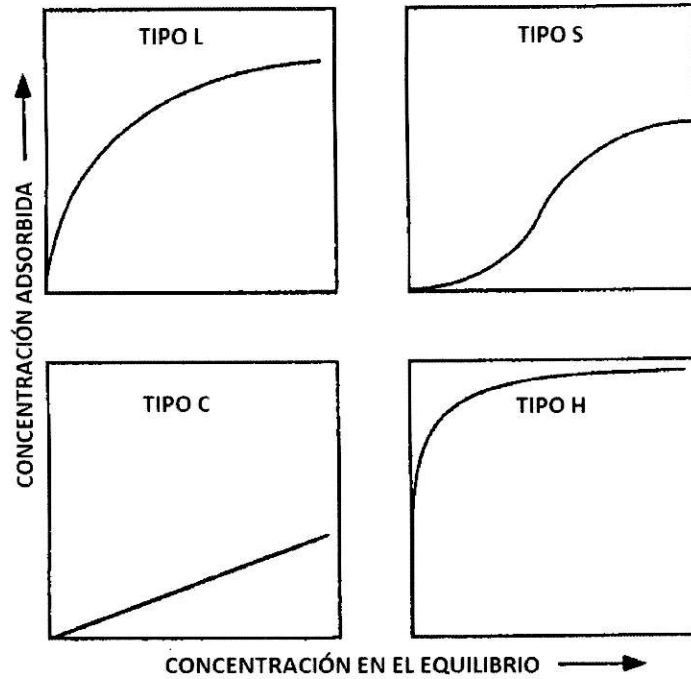
Cuando el adsorbato y adsorbente interactúan por medio de interacciones de tipo electroestáticas, se trata de una adsorción física o fisiadsorción, donde las moléculas están unidas a la superficie de manera débil y cuyos calores de adsorción son bajos. Por otro lado, si las moléculas adsorbidas reaccionan químicamente con la superficie

generando enlaces de tipo iónicos o covalentes, se habla de una adsorción química o quimiadsorción, cuya energía de enlace es más elevada que en una adsorción física (Tabla 5).

**Tabla 5.** Características de la adsorción física y adsorción química (adaptado de McBride, 1994).

<b>Propiedad</b>	<b>Adsorción Física</b>	<b>Adsorción Química</b>
Energía de enlace	< 10 Kcal/mol	> 20 Kcal/mol
Rango de temperatura de adsorción	Sólo por debajo del punto de ebullición del adsorbato	A temperaturas bajas y altas
Pendiente de la isoterma de adsorción	Mayor a altas concentraciones del adsorbato	Menor a altas concentraciones del adsorbato
Dependencia de las propiedades del adsorbente	Relativamente baja	Alta
Dependencia de las propiedades del adsorbato	Alta	Alta
Energía de activación para la adsorción	Baja o nula	Puede ser alta
Número de capas de moléculas adsorbidas	Múltiple	Una

Los fenómenos de adsorción pueden ser clasificados a partir de su representación gráfica, las cuales se conocen como isotermas de adsorción y describen el equilibrio de la adsorción de un material en una superficie, relacionando la cantidad de material unido a la superficie (concentración adsorbida) como función del material presente en la fase líquida o gaseosa (concentración en el equilibrio), a temperatura constante (Atkins, 1991). Según esto, existen cuatro tipos representaciones, utilizadas como modelos experimentales, para describir y clasificar las isotermas de adsorción.



**Figura 1.** Clasificación de las isothermas de adsorción, según Sposito (Adaptado de McBride, 1994).

La curva tipo L describe una alta afinidad de adsorción entre adsorbato y adsorbente, y usualmente indica quimiadsorción. La curva tipo S describe una adsorción cooperativa, indicando que las interacciones adsorbato-adsorbato son más fuertes que las interacciones adsorbato-adsorbente, lo que favorece un agrupamiento de las moléculas de adsorbato sobre la superficie, es decir que hay una adsorción continua a pesar de alcanzar una saturación. La curva tipo C sugiere una afinidad relativa de las moléculas de adsorbato con el adsorbente, y es observada solo en el rango bajo de adsorción. La curva tipo H describe una muy fuerte quimiadsorción adsorbato-adsorbente, y principalmente se refiere a casos más extremos de la curva tipo L.

Los procesos de adsorción de sustancias aniónicas son importantes en la química de los suelos, principalmente desde el punto de vista de su fertilidad. En la adsorción de especies aniónicas existen fuerzas de tipo electroestáticas como específicas de adsorción, en donde juegan un rol fundamental las cargas positivas originadas, principalmente, por la adición de protones a grupos de tipo Al, Fe-OH de la superficie, quedando generalmente retenidos de manera intercambiables.

Considerando la interacción de los aniones con la superficie, estos pueden ser clasificados como iones indiferentes, adsorbidos específicamente o determinantes del potencial. Los iones indiferentes presentan interacciones electroestáticas con la superficies y pueden ser atraídos o rechazados según sea la carga de la superficie. Esta adsorción no específica ocurre por la interacción con grupos Fe, Al-OH<sub>2</sub><sup>+</sup>, la cual se incrementa al aumentar la acidez del medio. Los iones adsorbidos específicamente presentan una alta energía de interacción con el adsorbente, atravesando la doble capa y alcanzando la superficie, pudiendo incluso llegar a reaccionar químicamente con ella, principalmente ligándose a la esfera de coordinación de átomos de Al o Fe. Los iones determinantes del potencial también interaccionan con la superficie pero se diferencian de aquellos adsorbidos específicamente por su capacidad para pasar en forma reversible por la interfase superficie-solución, lo que depende de las características de ambas fases. (Briceño, 1994).

En este caso, el intercambio aniónico depende de manera directa de la carga que presentan los coloides del suelo, la que se genera principalmente por protonación de los

componentes con carga variable cuando el pH del sistema es inferior a su punto de carga cero. En el caso de los suelo volcánicos chilenos se caracterizan por tener carga dependiente del pH y de la concentración del electrolito, por lo que es posible el intercambio aniónico.

Por otro lado, la adsorción de cationes, y por ende de metales pesados, puede ser descrita a partir de tres mecanismos (Cala, 1995). El primero corresponde a una complejación de esfera interna, lo que implica un mecanismo de enlace iónico o covalente entre el catión y la superficie, lo que corresponde a una adsorción específica. El segundo corresponde a una complejación de esfera externa, en la que el catión retiene su esfera de solvatación, por lo cual se entiende que existen enlaces de naturaleza electroestática entre el catión y el adsorbente, siendo una adsorción de tipo no específica. El último mecanismo corresponde a una asociación de un ión solvatado difuso, que no se compleja con los grupos reactivos de la superficie sólida, sino que neutraliza la carga superficial de modo deslocalizado. En este tipo de adsorción de tipo no específica, los cationes tienen libertad de moverse en la solución suelo, debido a que los enlaces se deben a fuerzas electroestáticas débiles.

#### **1.2.4.1. Importancia de la Materia Orgánica en la adsorción**

La presencia de compuestos orgánicos (principalmente Ácidos Húmicos, Fúlvicos y Huminas) y materia orgánica estabilizada (humus), generan en los coloides del suelo estructuras esponjosas y una extensa superficie específica, donde se encuentran



numerosos grupos funcionales (COOH, OH fenólicos, OH alcohólicos, NH<sub>2</sub>, NH y SH principalmente). Estos le confieren importantes propiedades de adsorción, principalmente por mecanismos de coordinación, de una gran variedad de especies aniónicas (Besoain, 1985), al interactuar con superficies inorgánicas coloidales activas del suelo. A esto se suman los complejos Al, Fe-Humus, en cuya superficie se pueden generar reacciones de intercambio de ligandos entre los grupos OH y aniones (Appelt y col, 1975; Miyake, 1979; Wada, 1980), por lo cual un incremento en el contenido de material orgánico en el suelo suele conllevar, en la mayoría de los casos, a un incremento en adsorción de aniones.

En el caso de las especies catiónicas, los enlaces entre éstas y la materia orgánica pueden considerarse como un intercambio de protones y cationes. Sin embargo, el alto grado de selectividad de la MO sugiere una coordinación directa mediante la formación de complejos de esfera interna con los grupos funciones existentes, pudiendo cambiar esta situación según el catión en estudio. Por ejemplo, en el caso del catión cadmio, a altos niveles de adsorción, se muestra una afinidad semejante al catión calcio por los sitios de enlace del suelo. Sin embargo a niveles bajos de adsorción, el Cd<sup>+2</sup> es fuertemente preferido al Ca<sup>+2</sup> en ciertos grupos de adsorción. Esto debido a que el catión divalente cadmio, considerado ácido de Lewis relativamente débil, prefiere enlazarse con ligandos catalogados como bases de Lewis relativamente débiles, como son los ligandos que contienen azufre. De este modo se explican las altas preferencias de los grupos funcionales sulfhidrilos de la MO de los suelos hacia el cadmio. Por el contrario, un

ácido de Lewis fuerte, como el calcio divalente, puede preferir para su coordinación, ligandos de fuerte naturaleza de base de Lewis, como el oxígeno (Cala, 1995).

En líneas generales, para cualquier ligando orgánico acomplejante, los metales de transición siguen un orden creciente de adsorción, que es consecuente con el aumento del número de electrones en los orbitales d (serie de Irvin-Williams) (Irvin y Williams, 1953).

#### **1.2.4.2. Otros factores determinantes de la adsorción**

Las propiedades de intercambio iónico del suelo se deben en gran medida a la presencia de cargas eléctricas en la superficie, las que dan lugar al intercambio catiónico o aniónico, según estas sean negativas o positivas. Estas cargas se dan como resultado de sustituciones isomórficas y de la ionización o protonación de grupos funcionales de la superficie de los sólidos que conforman la matriz del suelo (Carrasco y Sadzawka, 1985). Esto da lugar a la generación de una carga permanente o dependiente del pH. La primera se origina por la sustitución isomórfica en los aluminosilicatos presentes en la fracción arcilla, pudiendo generar carga positiva o negativa, siendo más común esta última (Bohn y col., 1979). La carga dependiente del pH se desarrolla de manera diferente a distintos niveles de acidez y de distinta forma para aniones y cationes. Para aniones, al incrementar el pH, la adsorción tiende a disminuir, mientras que para cationes se incrementa. La fuente principal de carga dependiente del pH se considera que es la pérdida o ganancia de protones en grupos funcionales de la superficie de los sólidos del suelo, lo cual se puede producir por ionización de los grupos silanol y

aluminol, desprotonación o protonación de la superficie de los óxidos e hidróxidos de Fe y Al, la presencia de alofán, imogolita y para-alofán, y por la desprotonación de grupos orgánicos (Carrasco y Sadzawka, 1985).

De lo anterior se desprende que el pH y el Punto de Carga Cero (PCC) o Punto Isoeléctrico (PIE) del suelo también son factores incidentes en la adsorción de especies, así como la minerología del mismo, siendo influenciado principalmente por la presencia de minerales de tipo amorfos y para-cristalinos.

Por último, la textura del suelo también condicionan la adsorción de especies sobre el suelo, ya que una elevada proporción de arcilla, que es la fracción más activa del suelo debido a su área superficial y densidad de carga, tiende a incrementar la adsorción de especies metálicas, quedando retenidos en posiciones de cambio, no así la arena, la cual carece de capacidad de fijación de cationes.

#### **1.2.5. Modelos de adsorción**

Muchos investigadores han propuesto ecuaciones que permiten representar en forma matemática y gráfica los procesos de adsorción, con el fin de obtener valores que puedan relacionarse con las propiedades de los suelos y que permitan explicar los mecanismos de adsorción de especies (Barrow, 1978). Dentro de estos modelos, dos de los más utilizados son el de Freundlich y el de Langmuir.

### 1.2.5.1. Modelo de Freundlich

Este modelo fue propuesto en forma empírica para representar matemáticamente fenómenos de adsorción de tipo L (Fig. 1). En este modelo, el término afinidad disminuye exponencialmente con el aumento de la saturación de la superficie, según la expresión

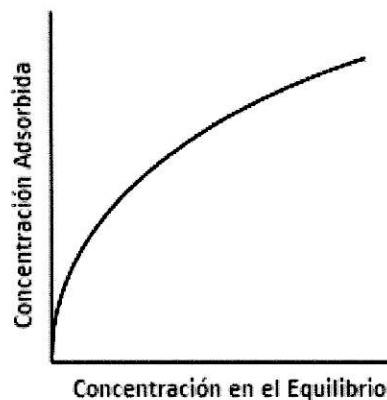
$$Ca = K Ce^{\frac{1}{n}} \quad \text{Ec. 1}$$

la cual puede ser linealizada mediante la aplicación de logaritmo, obteniendo la expresión

$$\log Ca = \log K + \frac{1}{n} \log Ce \quad \text{Ec. 2}$$

donde K representa la cantidad de sustrato adsorbida por el suelo cuando la concentración de la especie en la solución es igual a la unidad, que indica la máxima adsorción de la especie;  $1/n$  corresponde a un término de afinidad entre el adsorbente y adsorbato, lo que se relaciona a la intensidad o fuerza de enlace o adsorción; y  $C_e$  y  $C_a$  corresponden a la concentración en el equilibrio y adsorbida de la especie, respectivamente.

Este modelo se basa en la hipótesis de que la adsorción de la especie se da en una monocapa y no hay asociación de moléculas después de su adsorción. Por esto presenta una serie de limitaciones importantes, pues no admite fenómenos de saturación y está limitado a la representación de la adsorción de un compuesto único en una fase inerte, no permitiendo representar el caso de adsorción competitiva cuando la molécula específica está en presencia de otras sustancias que entran en competición durante la adsorción. Además asume una distribución energética heterogénea para la activación de los sitios de unión en la superficie (McBride 1994; Evangelou, 1998).



**Figura 2.** Representación gráfica general del ajuste matemático de Freundlich.

#### 1.2.5.2. Modelo de Langmuir

El modelo de adsorción de Langmuir (Fig. 3), corresponde a un modelo no lineal basado en un equilibrio cinético de primer orden, el cual puede ser representado por la ecuación

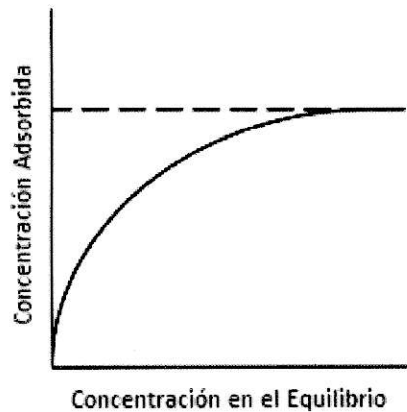
$$C_a = \frac{K X_m C_e}{1 + K C_e} \quad \text{Ec. 3}$$

la cual puede ser linealizada a la expresión

$$\frac{C_e}{C_a} = \frac{1}{K X_m} + \frac{C_e}{X_m} \quad \text{Ec. 4}$$

donde K corresponde a la constante que relaciona la adsorción y desorción, siendo mayor cuando la energía de adsorción o enlace es mayor;  $X_m$  corresponde a la adsorción máxima de la especie por el suelo; y  $C_e$  y  $C_a$  corresponden a las concentraciones en el equilibrio y adsorbida respectivamente.

Como limitantes, este modelo supone una adsorción únicamente en monocapa, en una superficie idealizada (plana), y no asume una heterogeneidad de sitios de adsorción en la superficie (sitios equivalentes), ya que la energía de adsorción la asume como constante e independiente del grado de cobertura de la superficie. Por otro lado, no permite diferenciar entre un proceso de adsorción y precipitación, ni considera competencia ni interacción entre las moléculas adsorbidas (McBride 1994; Evangelou, 1998).



**Figura 3.** Representación gráfica general del ajuste matemático de Langmuir.

Cabe destacar que la aplicación de estos modelos sobre la matriz suelo, no describe fehacientemente el fenómeno de adsorción, ya que estos están diseñados para ser aplicados sobre superficies simples, que cumplan ciertos requisitos como equivalencia de sus sitios activos o adsorción no competitiva. Pero si permiten comparar matrices con distintas condiciones, mediante la obtención de ciertos parámetros de adsorción, como la adsorción máxima de cada especie o la afinidad de los sitios de adsorción por las especies.

#### **1.2.6. Problemática Ambiental**

La presencia de especies aniónicas en los suelos puede generar cambios en la química superficial de estos, ya que pueden incidir en un incremento en la adsorción de especies contaminantes como pesticidas o metales pesados, o llegando incluso a inmovilizar estas especies, lo que no permitiría una desorción o movilización de las mismas, acumulándose en un área determinada de suelo, siendo mortal para plantas y animales,

además de contaminar cuerpos de aguas superficiales y subterráneos, tal es el caso de los aniones fosfato, arsenito y molibdato, objetos de estudio en este trabajo. El fosfato proviene principalmente de la aplicación de fertilizantes fosfatados en actividades agrícolas, los cuales son aplicados en grandes cantidades para obtener buenos rendimientos de los cultivos (Sadzawka y Carrasco, 1985). Una segunda fuente de esta especie en suelos, corresponde al uso de abonos que contienen diversas formas de fósforos. Por otro lado el anión arsenito proviene principalmente del uso de fertilizantes, herbicidas y fungicidas, pero existe una parte importante del contenido total en el suelo que corresponde a arsenito proveniente de arsénico de la roca madre del suelo, o de sulfuros magmáticos y menas de hierro (Jimenez, 1999). El anión molibdato tiene como principal fuente la fertilización de suelos agrícolas, particularmente con lodos de aguas servidas (McBride, 2005), aunque también depende en gran medida del contenido de molibdeno en el material parental, grado de intemperización y MO (Adriano, 2001), así como de la presencia de molibdenita.

En el caso de los contaminantes metálicos, el impacto generado depende en gran medida de la capacidad de complejación de estos con componentes del suelo, y su respuesta ante ciertos fenómenos y condiciones. Al ser especies no degradables, una vez que se encuentran en el medio ambiente, no pueden ser eliminados de manera natural y solo pueden distribuirse entre el suelo y los cuerpos de agua, cambiando su estado de oxidación o siendo asimilado por seres vivos (Nriagu y Pacyna, 1988), ingresando a la cadena trófica, generando un riesgo para plantas, animales y seres humanos (Cala, 1995).



En el caso particular del cadmio (número atómico 48; masa atómica relativa 112,40), la principal especie existente en la solución suelo es  $\text{Cd}^{+2}$ , pero también puede formar complejos iónicos como  $\text{CdCl}^+$ ,  $\text{CdOH}^+$ ,  $\text{CdHCO}_3^+$ ,  $\text{CdCl}_3^-$ ,  $\text{CdCl}_4^{-2}$ ,  $\text{Cd}(\text{OH})_3^-$  y  $\text{Cd}(\text{OH})_4^{-2}$ , además de complejos orgánicos.

Parte importante del cadmio existente en los suelos proviene del material parental, apareciendo en minerales primarios como inclusiones en los sulfuros correspondientes o como sustituyentes isomórficos de otros metales en silicatos, óxidos, carbonatos, etc (Cala, 1995). Este factor toma mayor importancia en suelos derivados de cenizas volcánicas, ya que erupciones y materiales volcánicos son fuentes importantes de este metal. Pero sin duda la principal fuente de cadmio en el suelo corresponde al uso de algunos fertilizantes fosfatados artificiales que presentan fracciones importantes de este catión. Se ha determinado que más del 50% de la entrada total de cadmio a suelos agrícolas corresponde a esta vía (De Meeus y col., 2002). Otras fuentes de menor importancia son el uso de lodos como fertilizantes y la quema de combustibles fósiles.

### **1.3. HIPÓTESIS**

La adsorción de los aniones fosfato, arsenito y molibdato, modifica la capacidad de adsorción de Cadmio, en el suelo serie Diguillín, debido al incremento de sitios cargados negativamente donde podrían unirse dichas especies, por lo que la materia orgánica juega un rol fundamental, de manera indirecta, al contribuir en la adsorción de los aniones mencionados, lo que incrementaría la adsorción de especies catiónicas.

### **1.4. OBJETIVOS**

#### **1.4.1 Objetivo General**

- Determinar la importancia de la materia orgánica sobre la adsorción los aniones fosfato, arsenito y molibdato en un suelo volcánico chileno (serie Diguillín), y evaluar el impacto que genera la presencia de estos aniones en la adsorción de Cadmio.

#### **1.4.2. Objetivos Específicos**

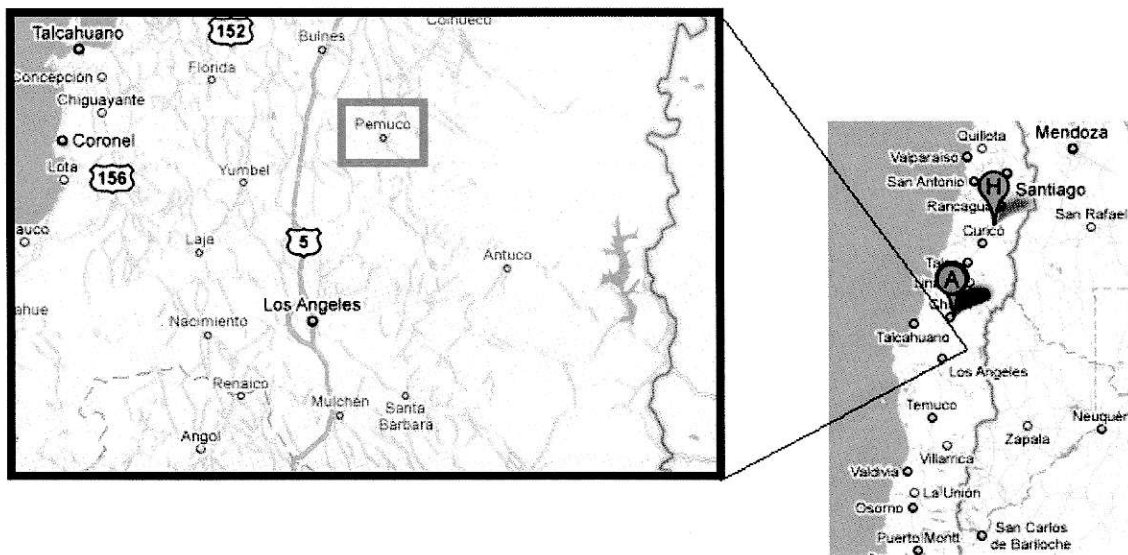
- Caracterizar un suelo serie Diguillín, determinando su pH, Conductividad Eléctrica, Contenido de Materia Orgánica y Textura.

- Determinar la contribución de la materia orgánica en la adsorción de los aniones fosfato, arsenito y molibdato en el suelo, mediante la oxidación de la materia orgánica con perhidrol.
- Estudiar y comparar el efecto de los aniones fosfato, arsenito y molibdato en la adsorción de Cadmio en el suelo chileno Diguillín con y sin materia orgánica, en un sistema monocomponente.
- Ajustar el proceso de adsorción de aniones y Cadmio en el suelo Diguillín con y sin materia orgánica, mediante la implementación de los modelos de adsorción de Freundlich y Langmuir.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Selección de muestras de suelo

El suelo seleccionado corresponde a un suelo serie Diguillín, de la familia Arrayán (clasificación Tepic Dystrandept), ubicado en un predio a 1200 metros al sur de Pueblo Seco, comuna de Pemuco, Provincia de Ñuble, VIII Región. La muestra utilizada en este trabajo corresponde al horizonte A (0 – 20 cm). Las muestras fueron tamizadas en un tamiz de 2 mm, secadas al aire y guardadas en frascos herméticos.



**Figura 4.** Ubicación de la zona de muestreo.

### 2.2. Caracterización de suelo

El suelo fue caracterizado según la siguiente metodología

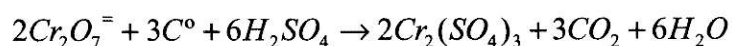
- **pH y Conductividad Eléctrica.** Se masó 20,00 gramos (exactitud 0,1 g) de suelo con una balanza analítica en un frasco de plástico de boca ancha, se agregó 50 mL de agua desionizada y se agitó durante dos horas con agitador orbital a 120 rpm. Finalizadas las dos horas, se agitó manualmente la solución varias veces y se introdujo el electrodo en la parte superior de la suspensión para leer el pH y la conductividad eléctrica hasta que se estabilizó la lectura. Este ensayo se realizó en duplicado (Sadzawka, 2004).

- **Determinación del Porcentaje de Humedad y Factor de Humedad.** En vasos previamente masados, se agregó y masó porciones de suelo entre 10 y 20 gramos. Se secó las muestras a 105°C durante 24 horas, en una estufa. Los vasos con las muestras secas se trasladaron a una desecadora y se dejó la hasta un peso constante. Se determinó el porcentaje de humedad por pérdida de agua (Sadzawka, 2004).

- **Determinación de la textura.** Se utilizó el método de la pipeta, el que relaciona la velocidad de sedimentación y el diámetro de las partículas (arena, limo y arcilla). En un vaso previamente masado se masó 50 g de suelo y se dejó secar a 105 °C por 24 horas. Luego en un vaso de dispersión se masó 100 g del suelo, se añadió 100 mL de agua destilada y se agitó hasta formar una suspensión. Posteriormente se agregó  $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$  saturado (30 mL) y se agitó hasta mezclar completamente para luego transferir la solución a una probeta de sedimentación (1L) y aforar con agua. Se midió la temperatura para determinar la constante k según la Ley de Stokes (Sadzawka, 2004). Transcurrido el tiempo estimado de sedimentación para limo + arcilla, se tomó una alícuota de 25 mL a 10 cm de profundidad y se transfirió a un recipiente, previamente masado, y se dejó

secar a 105 °C por 24 horas, en estufa. Finalmente, transcurrido el tiempo estimado de sedimentación para las arcillas, se tomó una alícuota de 25 mL a los 3 cm de profundidad y se transfirió a un recipiente, previamente masado, para secarlo a 105 °C por 24 horas en estufa. Con los datos obtenidos y el triángulo textural de la USDA, se determinó la textura del suelo (Sadzawka, 2004).

- **Determinación del Contenido de Materia Orgánica.** El método consiste en una combustión húmeda de la materia orgánica con una mezcla de  $K_2Cr_2O_7$  y  $H_2SO_4$ , según la reacción



Posteriormente se mide colorimétricamente el cromato reducido. Este método es aplicable a todos los suelos minerales (carbono orgánico < 20%). Para esto se preparó una solución estándar de sacarosa de 100 mg/mL de Carbono (C) y se preparó una serie de estándares de sacarosa de 0, 10, 20, 30, 40 y 50 mg/mL de C, a partir de la solución estándar. Posteriormente se pesó entre 1 y 2 gramos (exactitud 0,01 g) de suelo seco al aire en un matraz Erlenmeyer de 125 mL, incluyendo dos blancos y seis matraces con 1 mL de una serie de estándares de sacarosa. Se agregó dicromato de sodio 0,5 M (10 ml) y  $H_2SO_4$  96 % (20 mL). Se agitó la suspensión para evitar puntos localizados de ebullición. Posteriormente se dejó reposar sobre una plancha aislante bajo campana durante 30 minutos. Se agregó agua (70 mL), se mezcló y dejó reposar durante una noche (16 horas). Se preparó una curva de calibración de sacarosa y se mide la absorbancia a 600 nm, cuidando de no disturbar el sedimento del fondo y se calculó el

contenido de C en la muestra y blancos (Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, 2007).

- **Análisis químico total.** Se introdujo la muestra (0,25 g) en una bomba marca Parr y se agregó los ácidos HNO<sub>3</sub>, HF y HCl, en una proporción 3:1:1,5. Esta se cerró herméticamente y se calentó por 12 horas a 110 °C en estufa. Una vez terminado el proceso, se dejó enfriar a temperatura ambiente, y el contenido se transfirió a un vaso de teflón, luego se agregó H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> (1 g) calentándolo para facilitar la disolución. Luego el contenido se trasvasió a un matraz aforado de 100 mL, se enrasó con agua bidestilada, se homogenizó y se filtró con membrana de diámetro de poro de 45 µm. Finalmente, se guardó en frascos de polietileno para su posterior análisis en Espectroscopia de Absorción Atómica. Los resultados se reportaron en base seca (Bernas 1968).

### **2.3 Obtención de la fracción inorgánica del suelo**

La fracción inorgánica del suelo (s-MO), se obtuvo mediante la oxidación de la materia orgánica fácilmente degradable con peróxido de hidrógeno al 30%. Para esto, se masó 50 g de suelo seco al aire previamente tamizado (c-MO), se agregó 250 mL de peróxido de hidrógeno (30 % v/v), calentando sobre un manto calefactor. Adicionalmente se agregó 125 mL de agua oxigenada, cuidando de arrastrar todos los sólidos de las paredes del matraz. Se continuó calentando hasta eliminar todo el contenido orgánico. Para evitar el exceso de espuma se debió agregar un par de gotas de etanol. Finalmente, se agregó un poco de agua para coagular la mezcla y se filtró. Luego se dejó las muestras de suelo sin materia orgánica en los mismos filtros al aire por varios días y finalmente

las muestras se guardaron en recipientes herméticos. Se realizaron las determinación de MO a las muestras obtenidas para comprobar la efectividad del proceso de eliminación (Sadzawka, 2004). Este ensayo se realizó en duplicado

#### **2.4. Determinación de Fósforo disponible**

El contenido de fósforo disponible en las matrices de suelo c-MO y s-MO, se determinó mediante el método Olsen. Para esto se realizó una extracción del fósforo de la muestra con una solución de  $\text{NaHCO}_3$  a pH 8,5, mediante su agitación en un agitador recíproco por 30 minutos. Posteriormente se filtró el contenido y se decoloró los extractos de color oscuro agitando el contenido con carbón activado por 30 minutos y volviendo a filtrar posteriormente. Finalmente se añadió a 3 mL de la muestra, 3 mL de un reactivo mezclado (contiene Ácido Sulfúrico, Molibdato de Amonio, Ácido Ascórbico y Tartrato de Potasio), y posterior a dejó reposar por 1 hora. Se midió la absorbancia a 880 u 820 nm. Se determinó la cantidad de fósforo a partir de una curva de calibración previamente elaborada, con una serie de estándares de fósforo de 0,1; 0,4; 0,8; 1,2; 1,6 y 2,0 mg/L de P, a los cuales trataron de la misma forma que las muestras (Sadzawka, 2004).

#### **2.5. Determinación del Punto Isoeléctrico (PIE)**

Se determinó el PIE mediante un equipo Zeta Meter ZM-77 constituido por un microscopio Zeiss, una celda Riddick, Tipo II UVA, con cátodo de Pt-Ir, ánodo cilíndrico de Mo y un sistema automático para la transferencia de muestra. Se prepararon suspensiones de muestra ya sea suelo completo o fracción inorgánica (10 mg) en  $\text{KNO}_3$  0,001 M (100 mL), que se llevan a diferentes valores de pH por adición de



KOH 0,01 M o HCl 0,01 M. Con los valores promedio de movilidad electroforética de cada muestra se calculó el potencial zeta (PZ) mediante la ecuación de Helmholtz-Smoluchowski (Hunter, 1981). De la relación gráfica PZ versus pH se calculó el PIE (intercepto de la curva con el eje X), empleando un polinomio de grado cuatro para el ajuste gráfico.

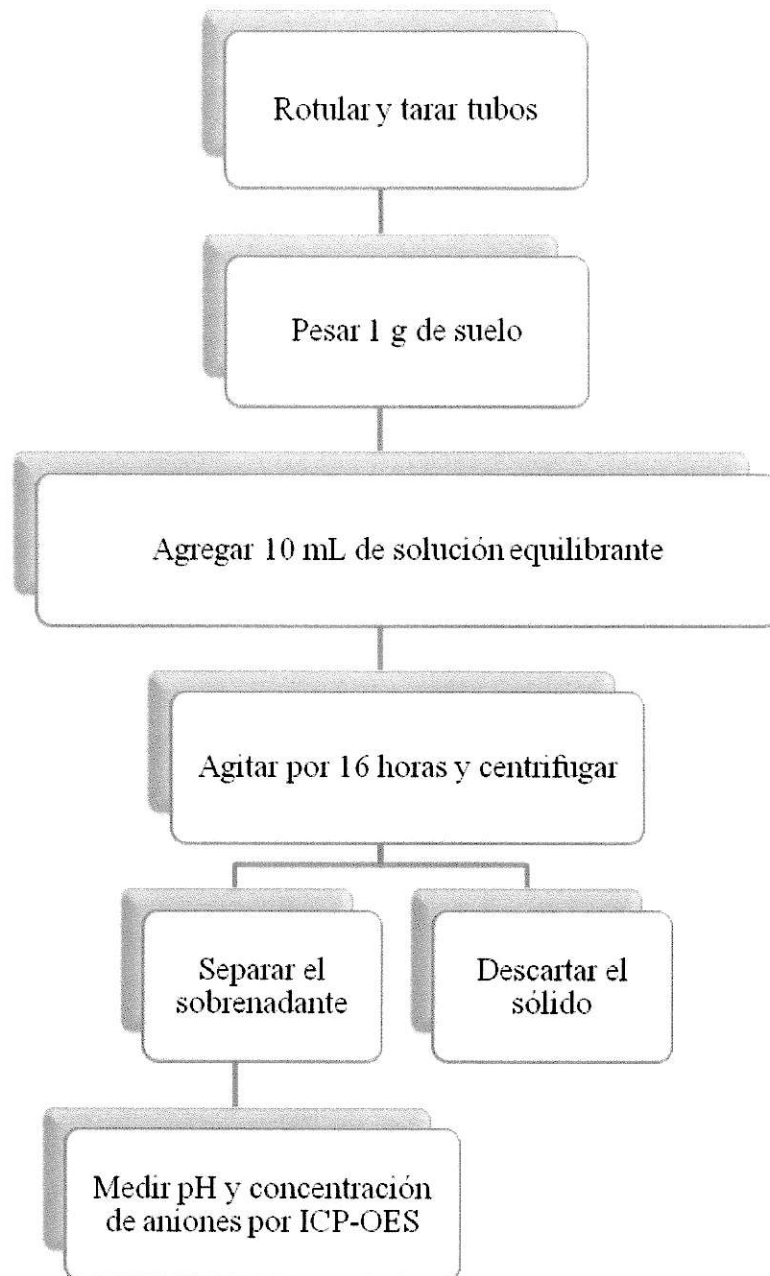
## **2.6. Cinética de adsorción de aniones y cadmio**

Los tiempos de equilibrio del proceso de adsorción de los aniones fosfato, arsenito y molibdato, y para el metal Cadmio, sobre el suelo Diguillín completo, se determinaron masando suelo seco (1 g) y colocándolo en tubos de centrifuga de 50 mL, añadiendo las soluciones equilibrantes de cada anión Fosfato, Molibdato y Arsenito y Cadmio (por separado), y agitando a tiempos distintos. Posteriormente se centrifugó a 10000 rpm por 10 minutos. Se midió la concentración de las especies por ICP-OES en las soluciones sobrenadantes obtenidas.

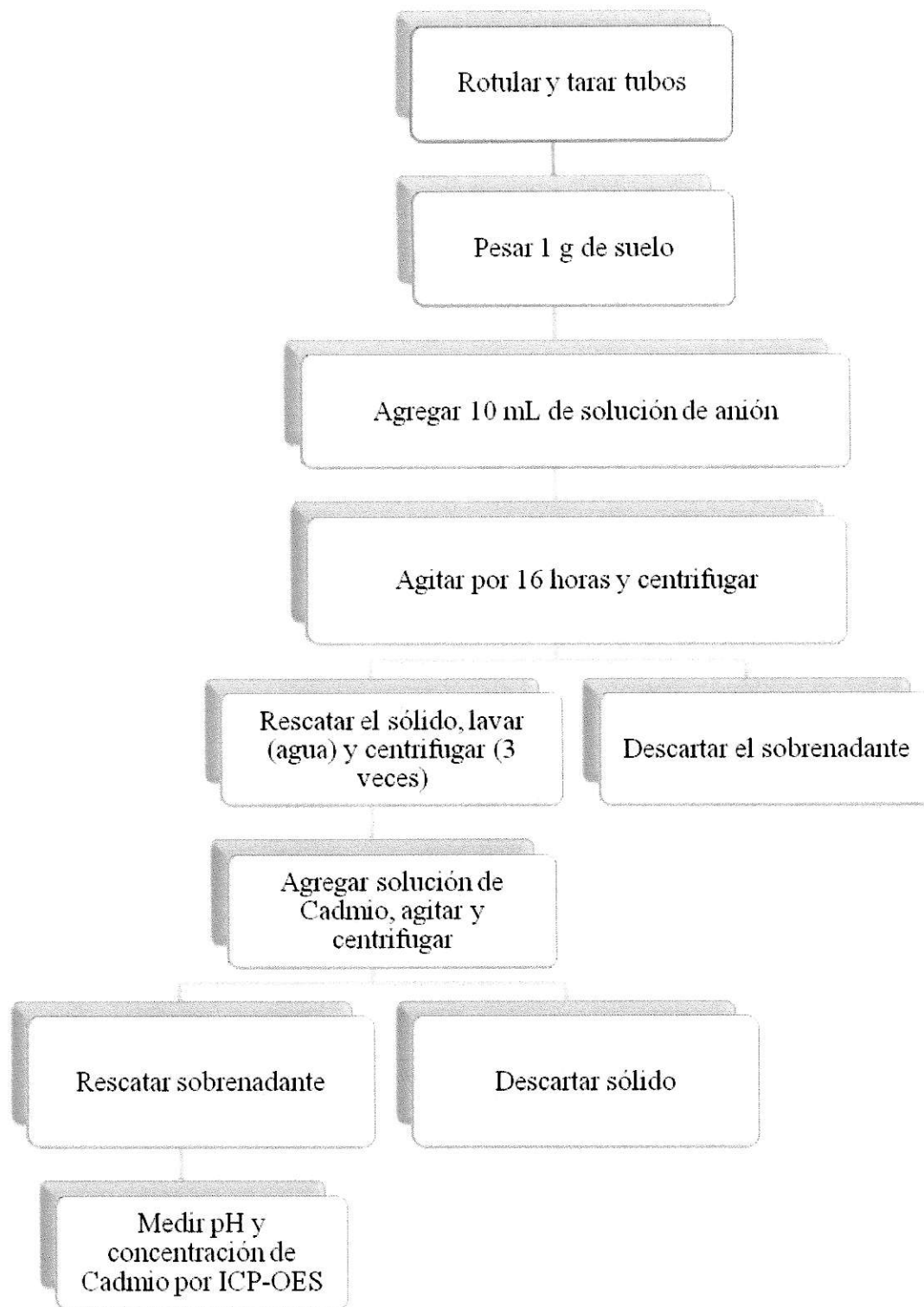
## **2.7. Isotermas de Adsorción**

Para elaborar las curvas de adsorción, se utilizó un sistema de Batch (Fig. 5 y 6) y se trabajó a fuerza iónica constante, empleando  $\text{KNO}_3$  0,05 M como solución equilibrante. Las curvas de adsorción de los aniones Fosfato, Molibdato y Arsenito sobre el suelo c-MO y el suelo s-MO, y de Cadmio sobre las matrices de suelo tratadas con los aniones mencionados, más los respectivos suelos control, se realizaron utilizando soluciones preparadas desde las sales de sodio, en el caso de los aniones, y a partir de la sal de nitrato para el cadmio. Para esto se utilizó una serie de tubos de centrifuga de 50 mL,

rotulados previamente, se pesó 1 g de suelo con y sin materia orgánica, se adicionó 10 mL de solución equilibrante respectiva y se agitó en agitador orbital a 120 rpm, a temperatura ambiente, por 16 horas. Pasado este tiempo, las soluciones obtenidas fueron centrifugadas a 10000 rpm por 10 minutos, y el sólido depositado en el fondo de éstos fue descartado. El sobrenadante se filtró y se midió su pH. Finalmente se determinó la concentración de las especies por ICP-OES (Figuras 5 y 6). Todas las curvas fueron realizadas en duplicado.



**Figura 5.** Diagrama de flujo protocolo de trabajo isotermas de adsorción de aniones en las matrices de suelo.



**Figura 6.** Diagrama de flujo protocolo de trabajo isotermas de adsorción de Cadmio en las matrices de suelo.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Caracterización del Suelo

Las muestras de suelo utilizadas en este estudio fueron caracterizadas con el fin de conocer sus propiedades físicas y químicas, y ver la incidencia de estas en los fenómenos de adsorción de aniones y cadmio. Los resultados obtenidos de la determinación de pH, conductividad eléctrica, humedad, contenido orgánico, textura y análisis químico total del suelo serie Diguillín se muestran en las tablas 6, 7 y 8.

**Tabla 6.** Caracterización del suelo serie Diguillín

<b>pH-H<sub>2</sub>O</b> (T° = 22,6 °C)	5,9 ± 0,1	<b>% Humedad*</b>	15,0 ± 0,1
<b>pH-KCl</b> (T° = 24,2 °C)	4,8 ± 0,1	<b>fh*</b>	1,15 ± 0,0
<b>pH-CaCl<sub>2</sub></b> (T° = 24,0 °C)	5,2 ± 0,0	<b>C (%)</b>	6,8 ± 0,1
<b>CE (ds/cm)</b>	0,65 ± 0,06	<b>MO (%)</b>	11,7 ± 0,1

\*Utilizado para la determinación de fósforo disponible.

**Tabla 7.** Textura del suelo serie Diguillín.

<b>Porcentaje de Arcilla</b> (<0,002 cm*) (%)	<b>Porcentaje de Limo</b> (0,002 a 0,05 cm*) (%)	<b>Porcentaje de Arena</b> (0,05 a 0,1 cm*) (%)	<b>Textura</b>
19,4 ± 0,01	45,1 ± 0,02	35,5 ± 0,01	Franca

\*Referido al diámetro de partícula.

**Tabla 8.** Análisis Químico Total del suelo serie Diguillín.

<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	<b>SiO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>
17,8	41,1	8,5

El pH-H<sub>2</sub>O indica que el suelo es levemente ácido. Esto se corrobora con el pH-KCl, el cual es levemente más ácido debido al intercambio catiónico entre los iones K<sup>+</sup> de la

solución y la acidez intercambiable del suelo, liberándose iones  $H^+$  a la solución los cuales son detectados por el electrodo. De acuerdo a esto, el pH obtenido en la solución de KCl se aproxima más al pH que podría presentar la superficie de las partículas del suelo (Black, 1957). Por otro lado, el pH-KCl parece ser un dato más reproducible, debido a que elimina los problemas causados por el secado de la muestra, la variación estacional y el efecto de la suspensión (Sadzawka y col, 1972, Barticevic, 1974), más aún por ser un electrolito indiferente, el cual no se adsorbe específicamente y en consecuencia entrega un valor de pH, obtenido desde la solución, que es más cercano al de las partículas de suelo. En cuanto al análisis granulométrico, éste muestra que el suelo Diguillín presenta una textura Franca, dominada por la presencia de limo. El porcentaje de arcilla existente en el suelo sugiere una importante actividad desde el punto de vista físico y químico, lo que tiene incidencia directa en el intercambio de sustancias iónicas. Por último, respecto al análisis químico, los contenidos de óxidos de silicio y aluminio muestran que la relación de estos es alta ( $> 2$ ), y el contenido de óxidos de Hierro es cercano a un 10%, lo que es esperable, debido a que se presume esté asociado a la fracción inorgánica y a complejos con Humus.

### **3.2. Caracterización de la fracción inorgánica**

La fracción inorgánica (suelo s-MO), obtenida a partir de la degradación de la materia orgánica fácilmente oxidable presente en el suelo (suelo c-MO), presenta diferencias importantes con relación al suelo completo. Su caracterización se muestra en la tabla 9.

**Tabla 9.** Caracterización de la fracción inorgánica del suelo serie Diguillín

<b>pH-H<sub>2</sub>O</b> (T° = 21,5 °C)	6,4 ± 0,1	<b>CE (ds/cm)</b>	0,61 ± 0,06
<b>pH-KCl</b> (T° = 21,7 °C)	5,5 ± 0,1	<b>% Humedad*</b>	20,0 ± 0,1
<b>pH-CaCl<sub>2</sub></b> (T° = 21,6 °C)	6,0 ± 0,1	<b>fh*</b>	1,2 ± 0,1

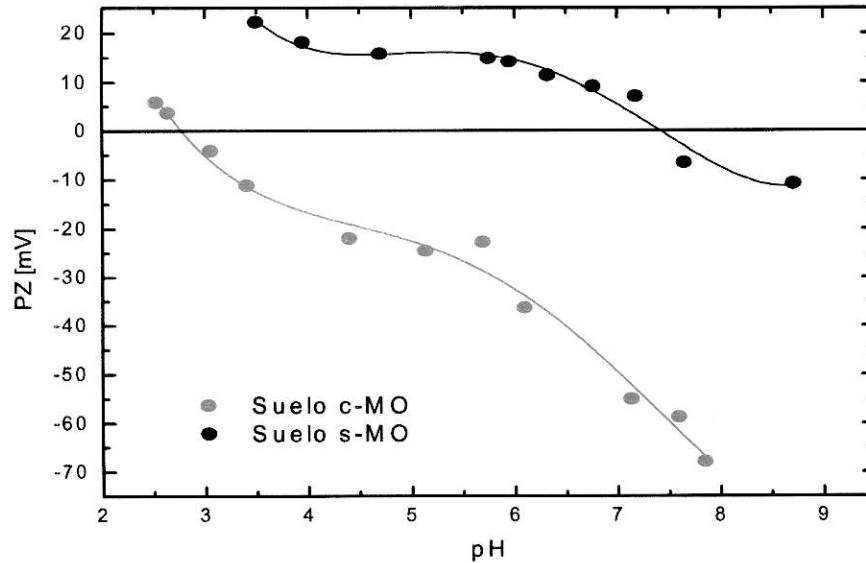
\*Utilizado para la determinación de fósforo disponible

De los datos de la Tabla anterior se puede indicar que los efectos de la eliminación de la materia orgánica del suelo tiene consecuencias que impactan los valores de pH medido en agua, KCl y CaCl<sub>2</sub> debido a que las sustancias húmicas presentan una alta capacidad de intercambio catiónico, lo que favorece la adsorción de especies cargadas positivamente y el desprendimiento de protones, generando un aumento de la acidez (Murray, 1994). Otro factor que puede incidir en el pH de la matriz obtenida es que el desprendimiento de la fracción orgánica permite una mayor incidencia de óxidos e hidróxidos de hierro, aluminio cristalinos y no cristalinos, y silicatos no cristalinos, sobre la carga e interacciones superficiales, los cuales presentan una carga neta positiva, a diferencia de la materia orgánica y silicatos cristalinos, imposibilitando el intercambio de protones y cationes de la superficie con la solución suelo.

### 3.3. Determinación del Punto Isoeléctrico (PIE)

Las curvas de titulación potenciométricas muestran la variación de la carga superficial en función del pH. A partir de estas, es posible determinar el PIE de las muestras, correspondiente al intercepto de la curva con el eje x (pH). Las curvas obtenidas (Fig. 7) fueron elaboradas por microelectroforesis, la cual es muy sensitiva a la composición superficial externa, por lo cual los valores de PIE reflejan la influencia de los grupos

superficiales dominantes, tal es el caso de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio y componentes orgánicos, como ácidos húmicos y fúlvicos.



**Figura 7.** Curvas de potencial zeta vs pH para suelo Diguillín y su fracción inorgánica.

**Tabla 10.** PIE del suelo Diguillín y su fracción inorgánica.

Muestra Suelo	c-MO	s-MO
PIE	$2,77 \pm 0,01$	$7,43 \pm 0,01$

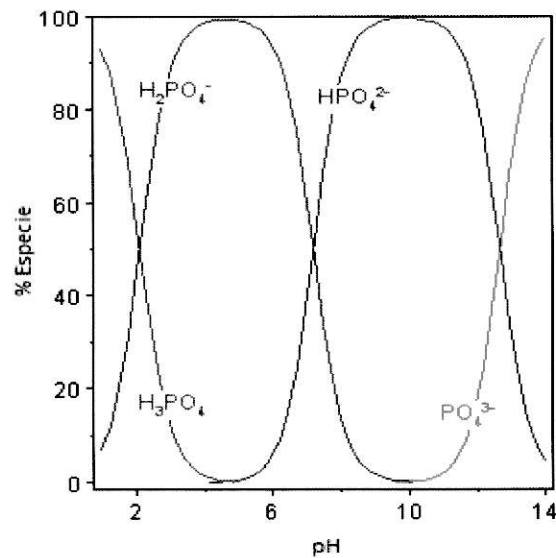
La curva de potencial zeta para el suelo s-MO, indica que la degradación de ésta deja expuestos en la superficie los grupos FeOH y AlOH de recubrimientos de baja cristalinidad, cuyos valores de PIE son cercanos a 9 (Escudey, 1983, 1986), lo que explica el aumento del PIE para la fracción inorgánica del suelo en estudio. Por otro lado, el PIE del suelo c-MO indica que la superficie reactiva de este suelo está dominada por una carga neta negativa al pH normal que se encuentra, no así su fracción inorgánica



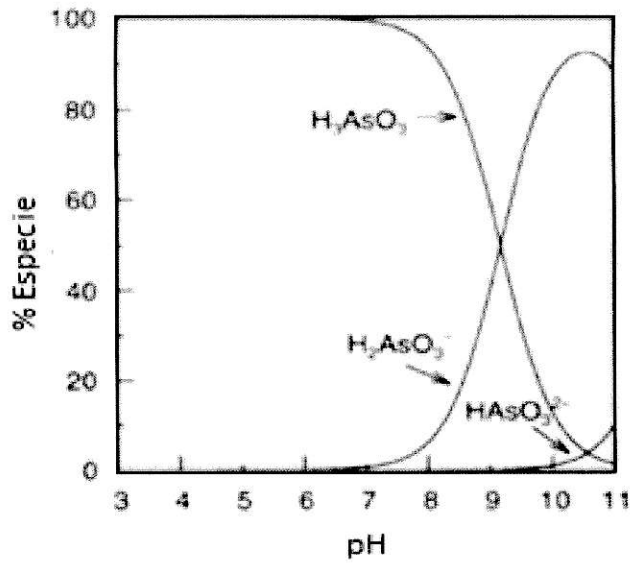
que presenta carga positiva. Este parámetro es característico de sus componentes orgánicos e inorgánicos y entrega importante información desde el punto de vista de la reactividad superficial de la matriz, incidiendo en la adsorción de especies.

### 3.4. Especiación de aniones y cadmio

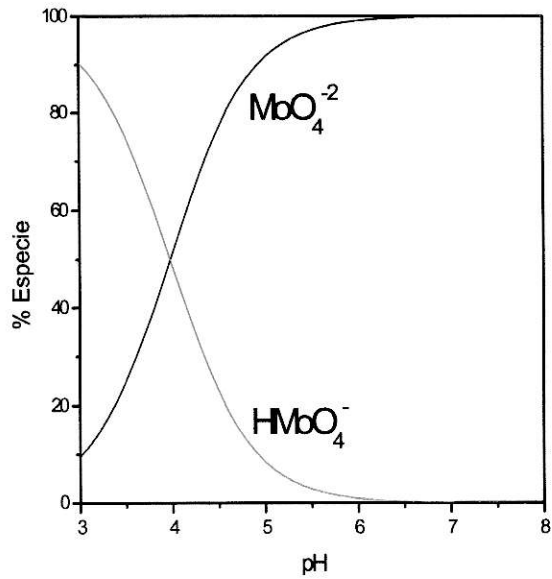
Las especies encontradas a los pH que se trabajaron las isotermas de adsorción para fosfato, arsenito, molibdato y cadmio corresponden a las especies  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$ ,  $\text{MoO}_4^{2-}$  y  $\text{Cd}^{+2}$ , respectivamente, tal como se observa en las figuras 8, 9, 10 y 11.



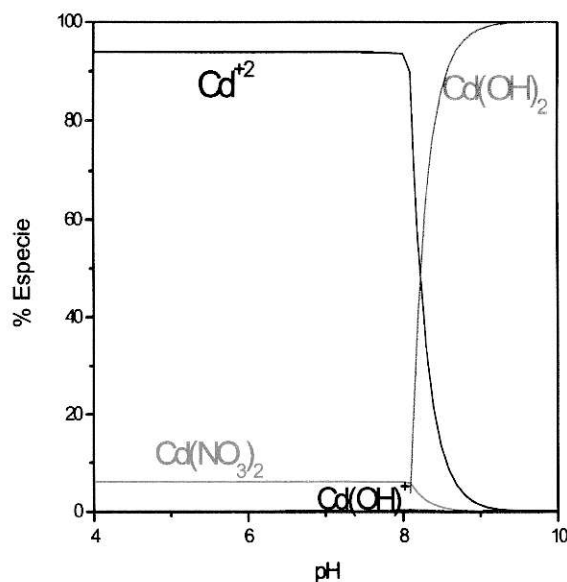
**Figura 8.** Especiación del fosfato en función del pH



**Figura 9.** Especiación del arsenito en función del pH



**Figura 10.** Especiación del molibdato en función del pH



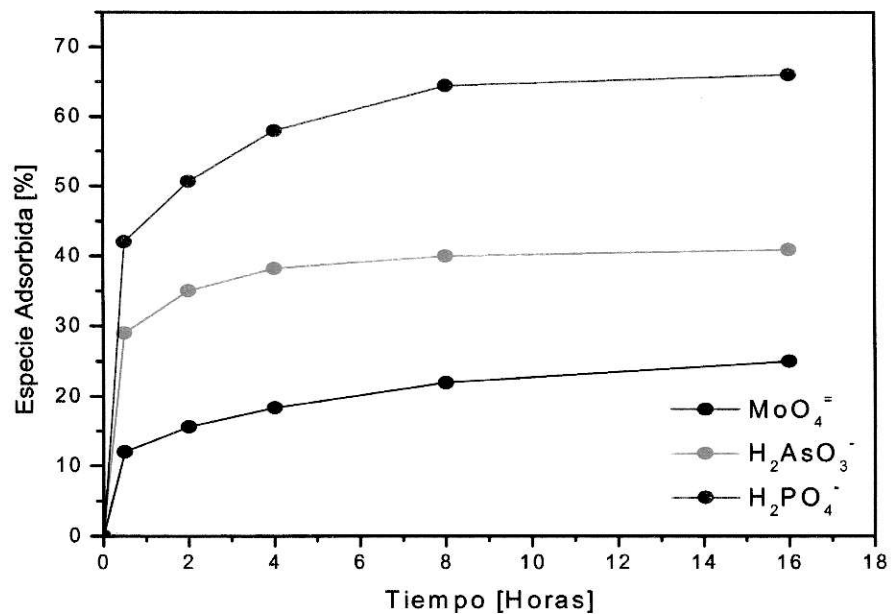
**Figura 11.** Especiación del cadmio en función del pH

Es importante destacar que en adelante, cuando se mencionen las especies fosfato, arsenito, molibdato y cadmio, se hace referencia a las especies indicadas en este punto.

### 3.5. Cinética de adsorción de fosfato, arsenito, molibdato y cadmio

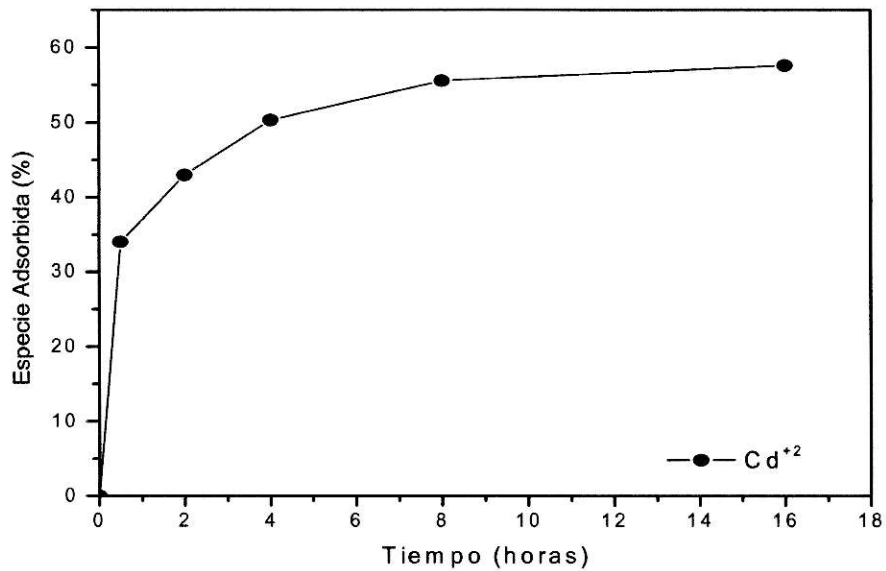
La dependencia de la adsorción de las especies aniónicas, sobre el suelo Diguillín, con relación al tiempo, se muestra en la Figura 12. La cinética de adsorción de los aniones muestra que este fenómeno se caracteriza por una primera etapa donde tempranamente, a los 30 minutos, el fosfato, arsenito y molibdato se han adsorbido en un 42%, 29% y 12%, respectivamente, alcanzando en etapas posteriores un equilibrio de adsorción cercano a las 16 horas de agitación, logrando adsorber un 66%, 41% y 25% de cada anión. Este comportamiento, similar para los tres aniones, coincide con los estudios

realizados sobre la adsorción de fosfato en función del tiempo sobre superficies de suelos que presentan óxidos, diferenciándose 2 etapas con diferente velocidades, donde la primera etapa demora cerca de 3 horas y la segunda entre 3 y 18 horas (Yekini, 1980). Por otro lado, Ryden y col (1977), explican que el efecto del tiempo sobre la adsorción de fosfato se da en una primera etapa rápida cuya reacción corresponde a una adsorción más física que va cambiando a quimisorción, seguida de una reacción mucho más lenta, la cual se debe a una difusión de fosfato en los poros estructurales de la fracción mineral. Esto indica que los aniones presentan una velocidad de adsorción en el orden fosfato > arsenito > molibdato, la cual está regulada por la afinidad que presenta el suelo hacia cada especie.



**Figura 12.** Cinética de adsorción de los aniones Fosfato, Arsenito y Molibdato.

En el caso del cadmio, este alcanza una adsorción sobre el suelo Diguillín de un 34% en los primeros 30 minutos, logrando a las 2 horas adsorber cerca de la mitad del catión añadido inicialmente (43%). Finalmente, el cadmio alcanza un equilibrio cerca de 16 horas después de agitación, logrando una adsorción de un 58% (Fig 13).



**Figura 13.** Cinética de adsorción de Cadmio.

### 3.6. Isoterma de Adsorción

Se construyeron isotermas de adsorción para los aniones fosfato, arsenito y molibdato, sobre las matrices de suelo c-MO y s-MO. Posteriormente, obteniendo la concentración de cada anión a la cual las matrices de suelo son saturadas, se trató ambas matrices con cada anión y sobre ellas se realizaron las respectivas curvas de adsorción de cadmio.

### 3.6.1. Isotermas de Adsorción de fosfato, arsenito y molibdato

Las isotermas de adsorción de los aniones, se realizaron a pH natural del suelo, a temperatura ambiente y con soluciones equilibrantes preparadas en  $\text{KNO}_3$  0,05 M. Éstas se muestran en las Figuras 14, 15 y 16.

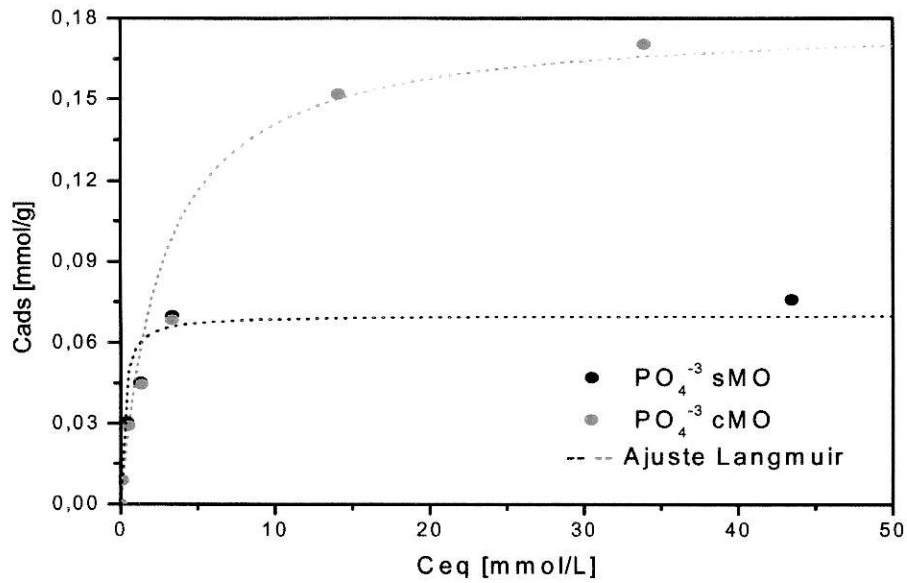
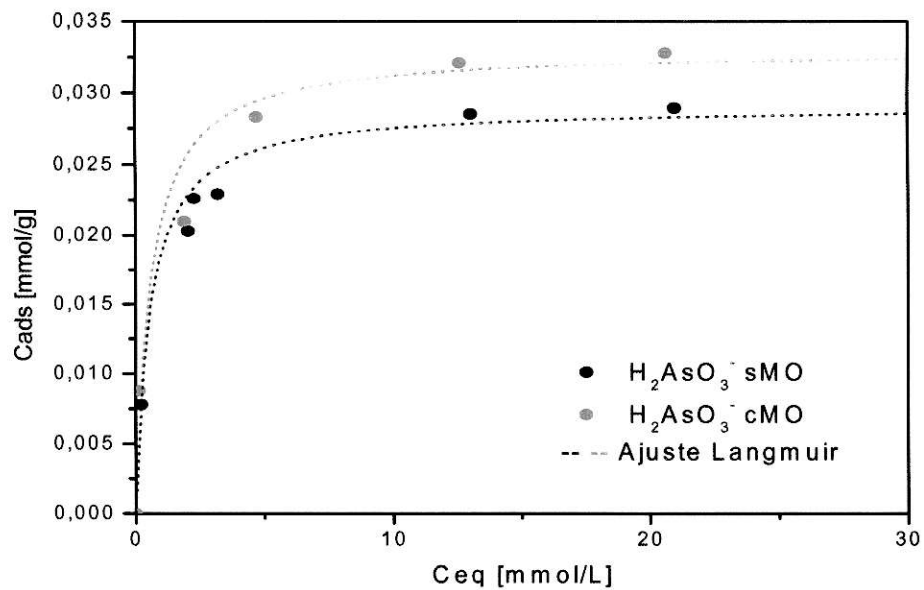
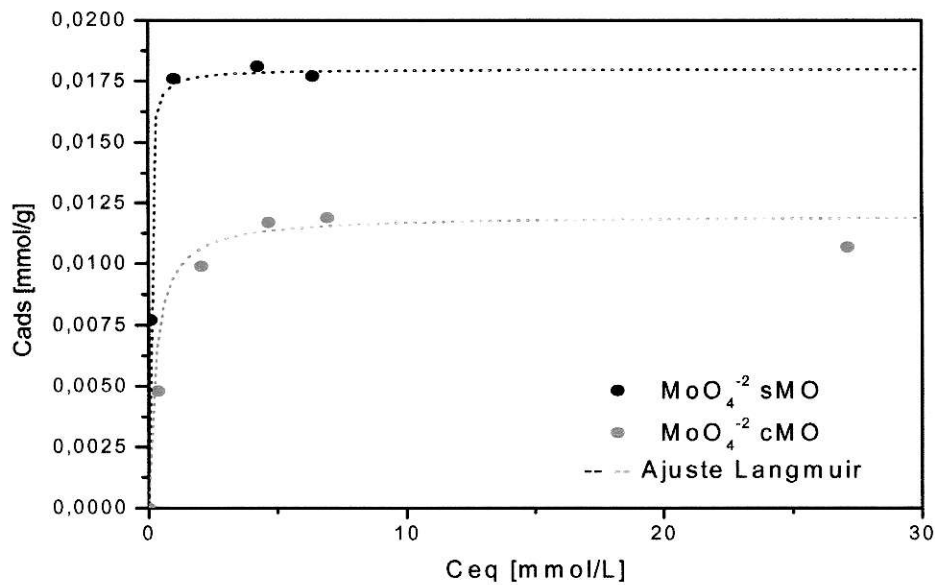


Figura 14. Isotermas de adsorción del anión fosfato.



**Figura 15.** Isothermas de adsorción del anión arsenito.



**Figura 16.** Isothermas de adsorción del anión molibdato.

De las Figuras anteriores se puede observar que los aniones fosfato, arsenito y molibdato alcanzan un equilibrio en su adsorción cuando las concentraciones ofrecidas son las que se muestran en la Tabla 11, 12 y 13 (destacadas). Estas concentraciones de cada anión fueron utilizadas para posteriormente tratar las matrices de suelo y de esta manera evaluar la incidencia de estos aniones en la adsorción de cadmio.

**Tabla 11.** Concentraciones ofrecidas, en el equilibrio y adsorbidas de fosfato en el suelo Diguillín y su fracción inorgánica.

<b>Suelo c-MO</b>			<b>Suelo s-MO</b>		
<b>Conc. Ofrecida [mmol/L]</b>	<b>Conc. en equilibrio [mmol/L]</b>	<b>Conc. adsorbida [mmoles/g]</b>	<b>Conc. ofrecida [mmol/L]</b>	<b>Conc. en equilibrio [mmol/L]</b>	<b>Conc. adsorbida [mmoles/g]</b>
0	0	0	0	0	0
0,9804	0,1225	0,0085	0,9804	0,1162	0,0086
3,3918	0,5319	0,0285	3,3918	0,3955	0,0299
5,7010	1,3540	0,0434	5,7010	1,2654	0,0441
10,1134	3,4421	0,0685	10,1134	--*	--*
<b>30,7216</b>	<b>14,1194</b>	<b>0,1654</b>	<b>30,7216</b>	<b>24,1237</b>	<b>0,0656</b>
50,0000	33,9615	0,1598	50,0000	43,0168	0,0700
72,8866	--*	--*	72,8866	66,4948	0,0639

\* Corresponden a puntos eliminados de las isotermas de adsorción al escaparse de la tendencia de las curvas.



**Tabla 12.** Concentraciones ofrecidas, en el equilibrio y adsorbidas de arsenito en el suelo Diguillín y su fracción inorgánica.

Suelo c-MO			Suelo s-MO		
Conc. Ofrecida [mmol/L]	Conc. en equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmoles/g]	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. en equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmoles/g]
0	0	0	0	0	0
0,8800	0,1176	0,0076	0,8800	0,1916	0,0067
3,4960	1,6320	0,0180	3,4960	1,7428	0,0174
5,6800	3,1400	0,0249	5,6800	3,6668	0,0303
6,5200	3,8680	0,0260	6,5200	4,4640	0,0291
<b>13,6000</b>	<b>10,8000</b>	<b>0,0274</b>	<b>13,6000</b>	<b>11,1600</b>	<b>0,0244</b>
20,4800	17,6400	0,0281	20,4800	17,9600	0,0247
34,9600	32,5600	0,0239	34,9600	32,3760	0,0244

\* Corresponden a puntos eliminados de las isotermas de adsorción al escaparse de la tendencia de las curvas.

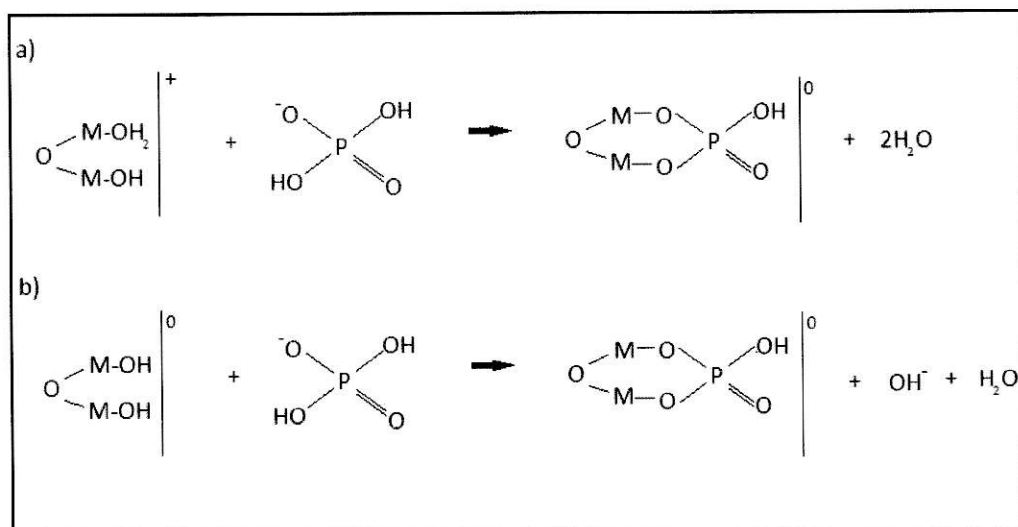
**Tabla 13.** Concentraciones ofrecidas, en el equilibrio y adsorbidas de molibdato en el suelo Diguillín y su fracción inorgánica.

Suelo c-MO			Suelo s-MO		
Conc. Ofrecida [mmol/L]	Conc. en equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmoles/g]	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. en equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmoles/g]
0	0	0	0	0	0
0,8500	0,3725	0,0048	0,8500	0,0822	0,0077
3,0438	2,0550	0,0099	3,0438	1,2947	0,0176
4,4500	--*	--*	4,4500	--*	--*
<b>5,8375</b>	<b>4,6675</b>	<b>0,0117</b>	<b>5,8375</b>	<b>4,0322</b>	<b>0,0181</b>
8,1250	6,9375	0,0119	8,1250	6,3688	0,0177
17,1875	--*	--*	17,1875	15,6563	0,0155
28,1875	27,1250	0,0107	28,1875	--*	--*

\* Corresponden a puntos eliminados de las isotermas de adsorción al escaparse de la tendencia de las curvas.

Por otro lado, de la Figura 14 y 15 se puede desprender que los aniones fosfato y arsenito presentan una mayor afinidad por la superficie de suelo que presenta materia orgánica, lo que se corrobora al observar los máximos de adsorción, particularmente el fosfato, el cual se adsorbe prácticamente el doble en comparación a la fracción inorgánica, mientras que el arsenito presenta alrededor de un 30% más de adsorción en el suelo c-MO. Este fenómeno está regulado por los altos contenidos de complejos orgánicos asociados a la presencia de Aluminio y Hierro (Al-Humus, Fe-Humus), corroborando los estudios realizados por varios investigadores los cuales señalan que la interacción de algunos aniones, como fosfato, con la superficie de los suelos se favorece por el contenido de sustancia orgánicas, particularmente de los ácidos húmicos y fúlvicos, generando uniones que podrían ser eventualmente más fuertes que las interacciones electrostáticas que pudieran generar una repulsión con la carga negativa existente en la superficie (Appelt y col, 1975; Yuan & Lavkilich, 1994; Mora & Canales, 1995b, y Hirade & Uchida, 2004). El mecanismo de adsorción más ampliamente aceptado para el anión fosfato y arsenito (Fig. 17), se basa en una reacción específica de intercambio con los ligandos OH y  $\text{OH}_2^+$  de los grupos Fe, Al-OH,  $\text{OH}_2^+$  superficiales de los óxidos metálicos hidratados (Hingston y col., 1967; Atkinson y col., 1974; Rajan y col., 1974; Ryden y Syers, 1975; Parfitt y Rusell, 1977; Bowden y col., 1977; Burns, P. y col, 2006; Zhu y col, 2011). En esta reacción, cuando el anión se adsorbe en los sitios positivos Al,  $\text{Fe-OH}_2^+$ , se desplaza el agua coordinada con neutralización de la carga positiva, y cuando el anión se adsorben los sitios neutros Al, Fe-OH, se desplazan iones  $\text{OH}^-$  sin modificación de la carga de la superficie. Cabe destacar que los grupos OH y  $\text{OH}_2^+$  que toman parte en la reacción de intercambio de ligandos son los que se

encuentran unidos a un solo ión Fe o Al (grupos OH tipo A, de coordinación 1), en cambio los grupos OH que se encuentran unidos a dos o tres iones Fe o Al (tipo B y C respectivamente) parecen ser menos reactivos (Parfitt y col, 1977).



**Figura 17.** Esquema de reacción para los aniones fosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) y arsenito ( $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$ ), con los ligandos  $\text{OH}_2^+$  (a) y  $\text{OH}$  (b) de la superficie de un óxido metálico (Sadzawka y Carrasco, 1985).

Originalmente se pensaba que los grupos Al, Fe-OH,  $\text{OH}_2^+$  activos de los Andisoles (de características similares a suelos serie Diguillín), se debían al alofán y a los óxidos amorfos de Hierro y Aluminio asociados (Saunders, 1959a, b). Sin embargo, Ryden y Syers (1975), determinaron que las curvas de adsorción de fosfato en suelos de diferente composición mineralógica indicaban mecanismos similares para este proceso, por lo que se concluyó que la adsorción se debía no solo a los grupos Al, Fe-OH de la superficie de óxidos metálicos hidratados y aluminosilicatos, si no que también a los grupos activos de los bordes de los aluminosilicatos cristalinos y de los complejos Al, Fe-Humus. Por otro lado, Appelt y col. (1975) y Miyake (1979) destacan la importancia de los

complejos Al, Fe-Humus en la adsorción de fosfato, al igual que Mizota (1977), el cual observó que su adsorción se reducía al tratar las muestras con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> o ditionito, y que en horizontes con bajo contenido de alofán e imogolita (A1), existía igualmente una alta adsorción de este anión.

En el caso particular del fosfato, la diferencia entre la adsorción sobre la matriz con MO y sin MO es extremadamente alta. Esta diferencia puede ser atribuida a 2 variables. La primera es que se genere una precipitación del fosfato debido a su interacción con los sistemas de óxidos metálicos hidratados (Dean, 1949; Hemwall, 1957), la cual se da particularmente a altas concentraciones del anión (Wada, 1959), tendiendo a confundir este último con el fenómeno de adsorción. La segunda variable a considerar es que la mayor parte del fósforo extraíble se encuentra ligado a la materia orgánica del suelo, por lo cual el alto contenido de fosfato determinado pudo ser en parte correspondiente al fósforo disponible presente en el suelo completo. Esta diferencia en los niveles de fósforo extraíble en ambas matrices se muestra en la Tabla 14.

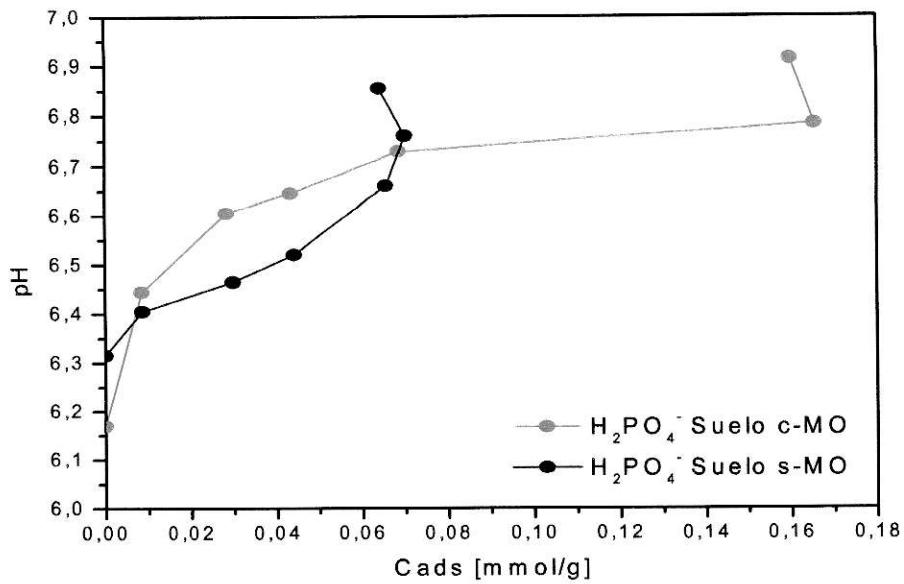
**Tabla 14.** Fósforo disponible en ambas matrices de suelo.

Suelo c-MO [mg P/kg]	Suelo s-MO [mg P/kg]
14,39	0,55

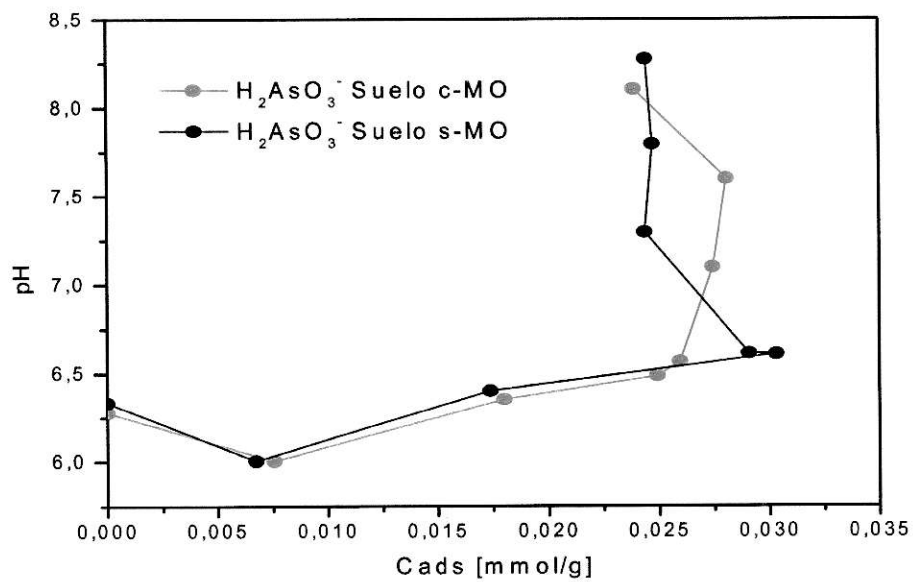
Por otro lado, el anión molibdato presenta una mayor afinidad por la matriz de suelo s-MO, lo que se ve reflejado en la Figura 16, donde se observa cerca de un 40% más de adsorción por parte de ésta. Estos resultados son similares a estudios realizados por diversos investigadores (Jarrel y Dawson, 1978; Karimian y Cox, 1978; Zhang y Sparks,

1989; Yuan y Lavkulich, 1994; Goldberg y col., 2002; Hirade y Uchida, 2004), los cuales resaltan el rol de los óxidos de Fe y Al, así como de aluminosilicatos paracrystalinos y no cristalinos, como responsables de una fuerte adsorción de molibdato en los suelos. Esta adsorción se postula como un mecanismo de dos etapas, en donde una primera etapa el ión molibdato es atraído electrostáticamente formando un complejo par-iónico rápidamente. Posteriormente, en la segunda etapa el anión es tomado de la superficie para romper el enlace entre el Fe e hidroxilos, permitiendo que el anión utilice una nueva posición por intercambio de ligandos o penetración por difusión (Hingston y col., 1972; Bohn y col., 1985). La molécula de agua de la superficie forma un nuevo enlace entre el molibdato y los óxidos de Fe superficiales, formando un complejo de esfera interna en la superficie coloidal, finalizando un mecanismo muy similar al que sigue la adsorción de los aniones fosfato y arsenito.

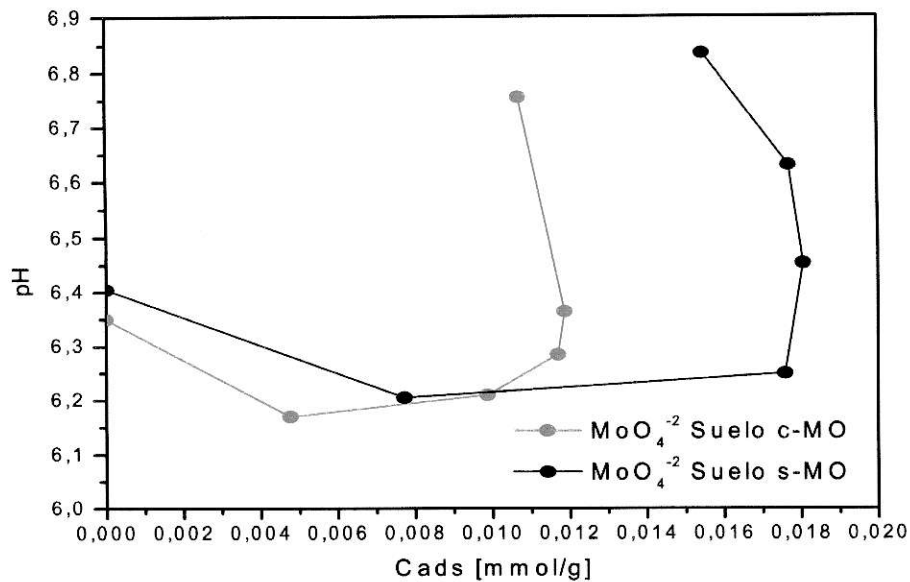
En todos los casos, la adsorción específica de los aniones provocó un incremento del pH, tal como se muestra en las Figuras 18, 19 y 20, lo que corrobora la liberación de iones hidroxilos a la solución del suelo, permitiendo corroborar que el mecanismo de adsorción corresponde a un intercambio de ligandos, como se mostró en la Figura 17.



**Figura 18.** Efecto de la adsorción del anión fosfato sobre el pH del sobrenadante en el suelo Diguillín.



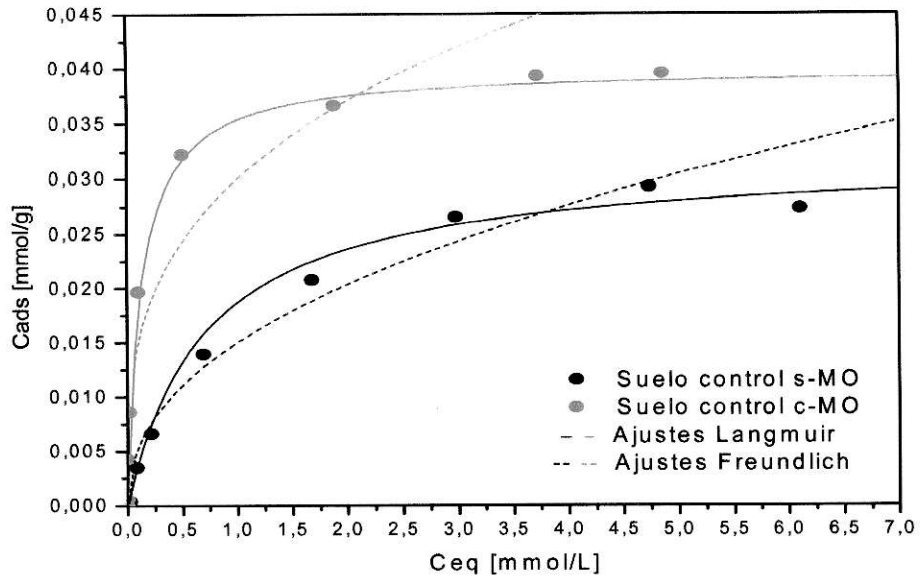
**Figura 19.** Efecto de la adsorción del anión arsenito sobre el pH del sobrenadante en el suelo Diguillín.



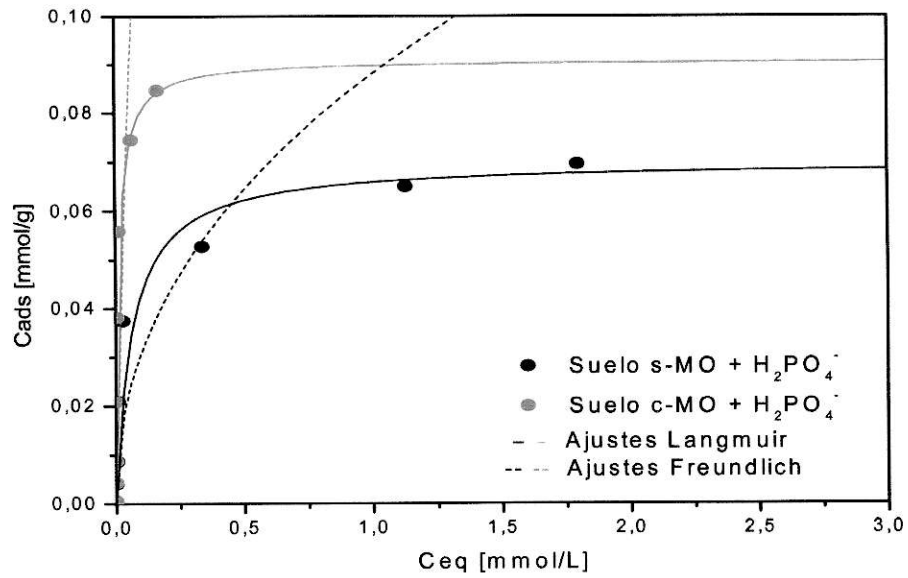
**Figura 20.** Efecto de la adsorción del anión molibdato sobre el pH del sobrenadante en el suelo Diguillín.

### 3.6.2. Isotermas de Adsorción de Cadmio

Las isotermas de adsorción de cadmio sobre las matrices de suelo c-MO y s-MO, tanto control como tratadas con los respectivos aniones, se realizaron a pH original del suelo, a temperatura ambiente y con soluciones equilibrantes preparadas en KNO<sub>3</sub> 0,05 M. Estas curvas para el suelo completo y su fracción inorgánica se muestran en las Figuras 21, 22, 23 y 24.

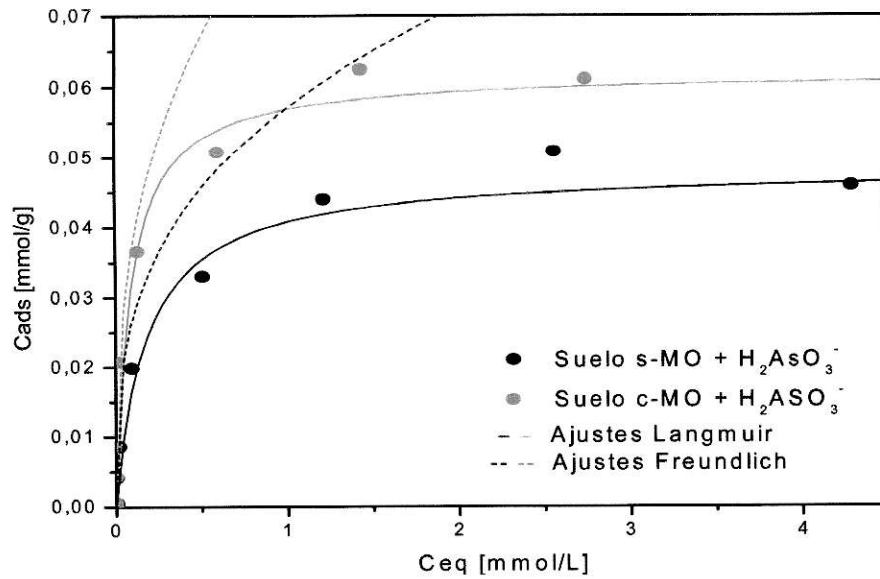


**Figura 21.** Isothermas de adsorción de Cadmio sobre los suelos control.

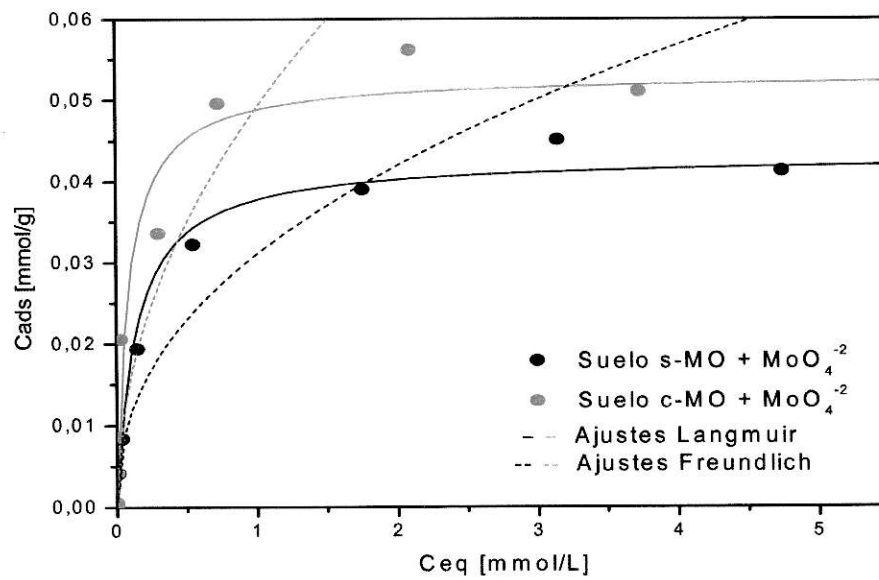


**Figura 22.** Isotherma de adsorción de Cadmio sobre los suelos tratados con fosfato.



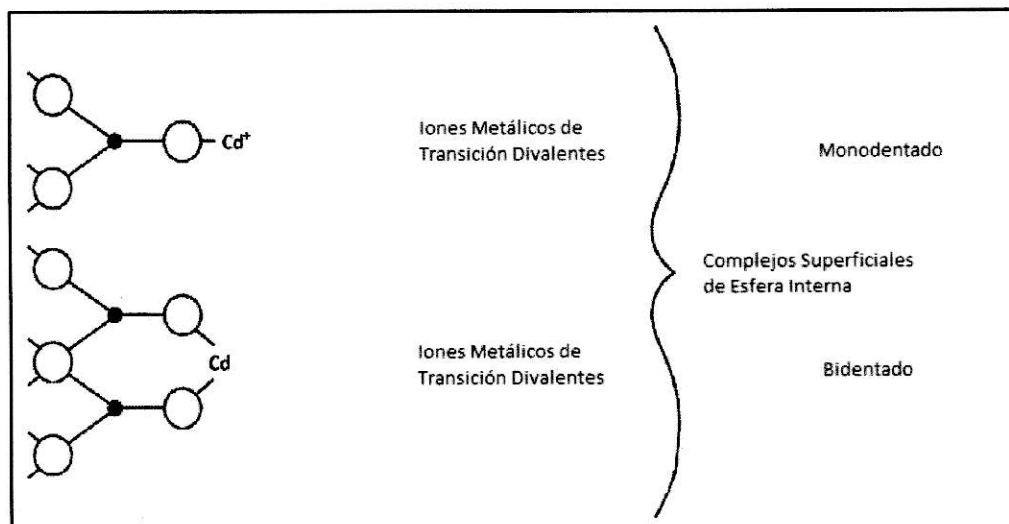


**Figura 23.** Isotherma de adsorción de Cadmio sobre los suelos tratados con arsenito.



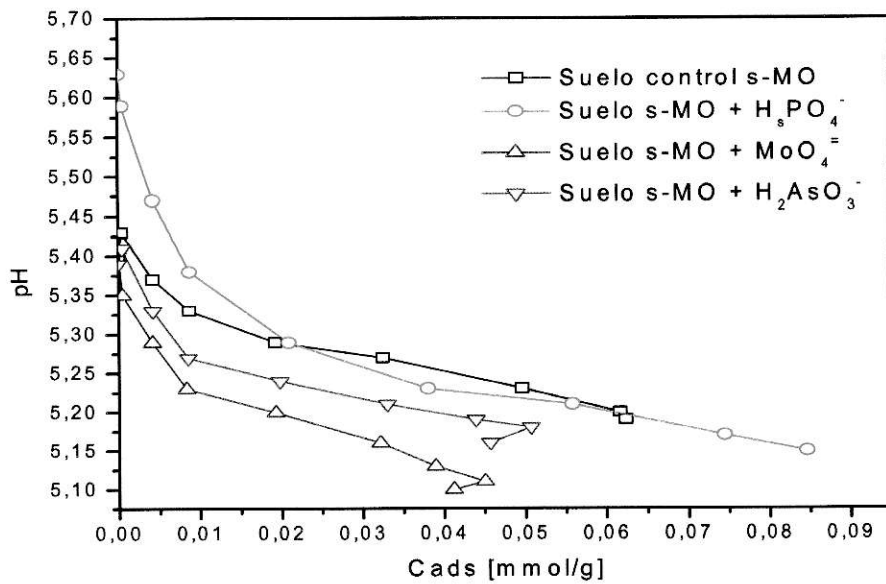
**Figura 24.** Isotherma de adsorción de Cadmio sobre los suelos tratados con molibdato.

En la Figura 21 se observa que la adsorción del Cadmio en suelo c-MO es mayor que en el suelo s-MO, debido a que la mayor parte de los componentes orgánicos del suelo le confieren una carga superficial negativa. Los enlaces entre el cadmio y los grupos orgánicos son considerados como un intercambio entre protones y el catión metálico, el cual depende en gran medida del grado de selectividad que presenta la materia orgánica hacia este catión, lo que sugiere una coordinación directa mediante formación de complejos de esfera interna (adsorción específica) con los grupos funcionales existentes (Cala, 1995), no descartando complejos multiligandos, pero debido al impedimento estérico lo más probable es que se de formando complejos monodentados o bidentados (Fig. 25).

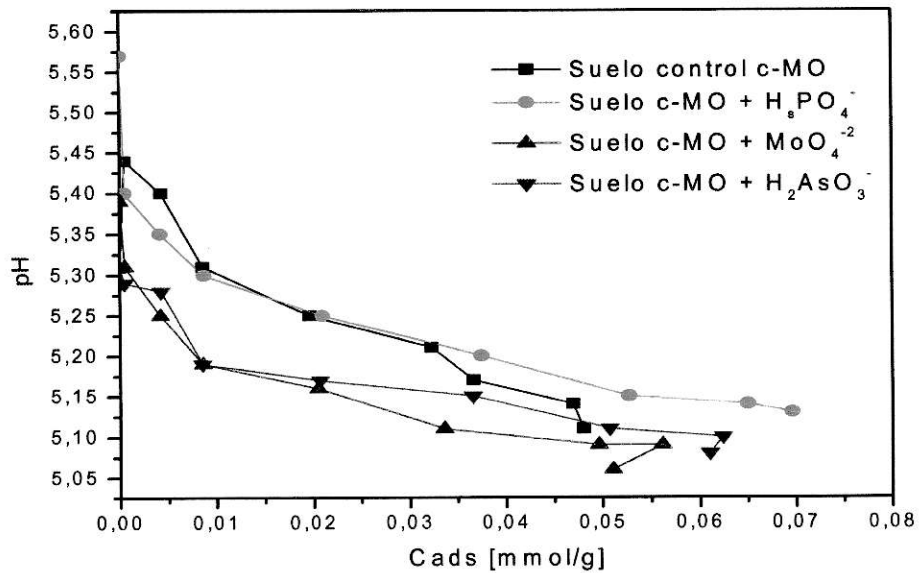


**Figura 25.** Esquema de reacción para el Cadmio con la superficie de los suelos (Sparks, 1995).

Este mecanismo describe una disminución del pH en la adsorción de cadmio, en todas las matrices de suelo c-MO y s-MO, tal como se muestra en las Figuras 26 y 27.



**Figura 26.** Efecto de la adsorción de cadmio sobre el pH del sobrenadante en las matrices de suelo Diguillín s-MO.

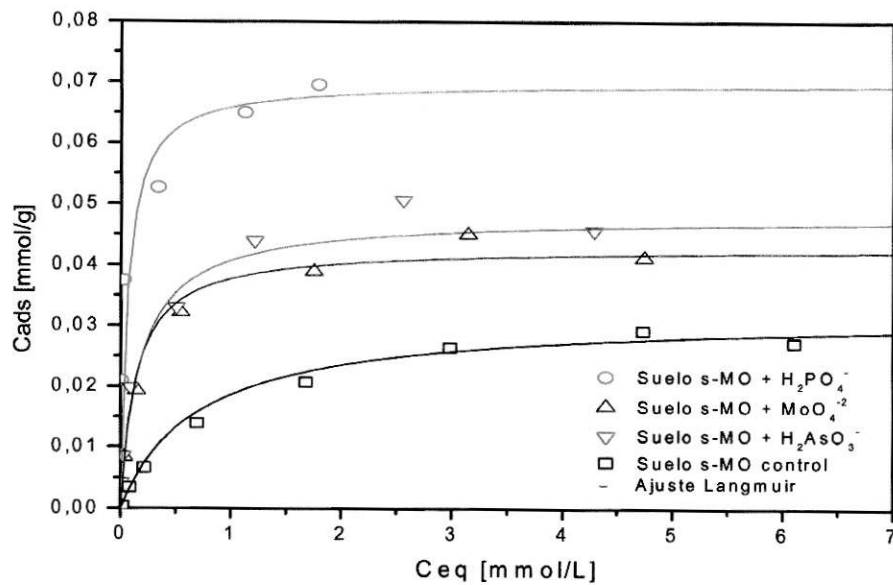


**Figura 27.** Efecto de la adsorción de cadmio sobre el pH del sobrenadante en las matrices de suelo Diguillín c-MO.

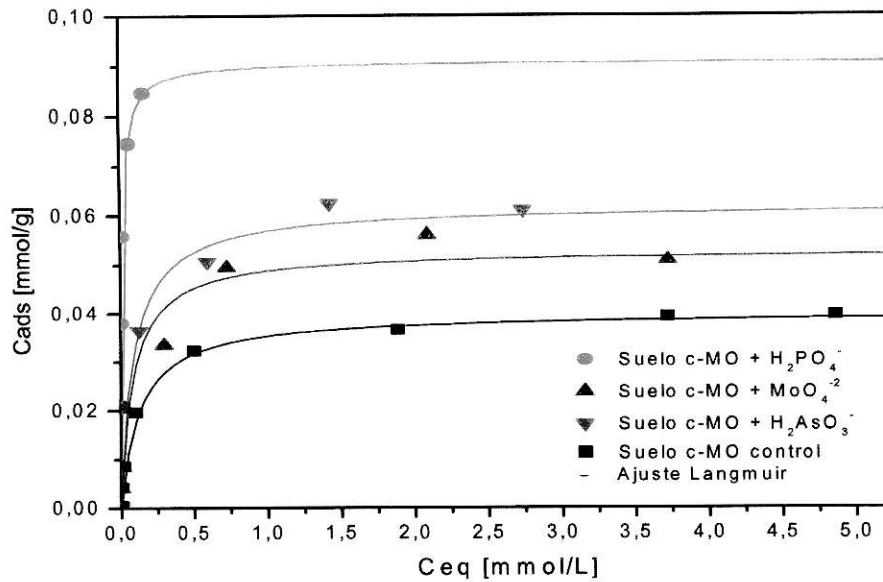
En las matrices de suelo tratadas con los aniones, la adsorción del Cd en el suelo c-MO es mayor que en el suelo s-MO, tal como se muestra en las Figuras 22, 23 y 24. Esta diferencia de adsorción corresponde aproximadamente a un 20%, 25% y 20% para los suelos tratados con fosfato, arsenito y molibdato, respectivamente, y se debe, en el caso de los dos primeros, a que los aniones se adsorbieron con mayor fuerza sobre la superficie con contenido orgánico, por lo cual se genera un incremento de la carga negativa en la superficie de las partículas de suelo, generado por la adsorción de dichos aniones. En las matrices tratadas con el anión molibdato, a pesar de que éste se adsorbió con mayor intensidad sobre el suelo s-MO, generando mayor cantidad de sitios negativos en la superficie, el cadmio presenta una mayor adsorción sobre el suelo c-MO, por lo cual se puede inferir que la presencia de contenido orgánico tiene mayor incidencia en la carga superficial negativa del suelo que la que puede ser generada por la adsorción del anión molibdato.

Los sitios de adsorción donde se genera la unión del metal con el absorbente, podrían ser clarificados mediante el empleo de técnicas termogravimétricas en el caso de la fracción inorgánica del suelo, principalmente para arcillas, o mediante estudios de desorción por IR y DRX, lo que podría clarificar si el cadmio, considerado ácido de Lewis relativamente débil, tiene tendencia a enlazarse con ligandos catalogados como bases de Lewis relativamente débiles, como lo son aquellos grupos funcionales que contienen azufre, como los grupos sulfhidrilos presentes en la MO, o sobre grupos carboxílicos e hidroxilos, u óxidos metálicos presentes en la fracción inorgánica del suelo (Cala, 1995).

Finalmente se puede destacar que las matrices tratadas con los aniones, tanto en el suelo c-MO y suelo s-MO, presentan una mayor adsorción de cadmio con respecto al respectivo suelo control, lo que es un claro indicio de que la adsorción previa de los aniones fosfato, arsenito y molibdato tiene como resultado un incremento de sitios activos con carga negativa en la superficie, donde el catión divalente puede unirse. Estos resultados se pueden observar en las Figuras 28 y 29, donde se observa, para ambas matrices, que la adsorción de cadmio sigue la secuencia selectiva suelo+fosfato > suelo+arsenito > suelo+molibdato > suelo control.



**Figura 28.** Isotermas de adsorción de Cadmio sobre el suelo s-MO.



**Figura 29.** Isotermas de adsorción de Cadmio sobre el suelo c-MO.

### 3.7. Ajustes Matemáticos de las isotermas

Las Tablas 15 y 16 muestran los parámetros obtenidos a partir de los ajustes realizados según el modelo de Freundlich y Langmuir, para las isotermas de adsorción de aniones e isotermas de adsorción de Cadmio. Según los valores de  $r^2$ , el modelo matemático de Langmuir interpreta de mejor manera los fenómenos de adsorción de aniones y Cadmio, ya que presenta coeficientes de correlación mayores a 0,99 en todos los casos, no así el modelo de Freundlich el cual arroja valores de  $r^2$  que varían entre 0,69 y 0,973, la mayoría bajo 0,9.

**Tabla 15.** Parámetros de Freundlich y Langmuir para las isotermas de adsorción de aniones en suelo Diguillin

Muestra	Parámetros Freundlich			Parámetros Langmuir		
	K	1/n	R <sup>2</sup>	Xm [mmol/g]	K [L/mmol]	R <sup>2</sup>
Suelo c-MO + H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0,033	0,530	0,962	0,176	0,368	0,993
Suelo c-MO + MoO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	0,007	0,324	0,953	0,011	30,817	0,999
Suelo c-MO + H <sub>2</sub> AsO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,015	0,223	0,792	0,029	1,745	0,999
Suelo s-MO + H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0,038	0,151	0,919	0,066	4,892	0,997
Suelo s-MO + MoO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	0,013	0,149	0,690	0,018	27,175	0,999
Suelo s-MO + H <sub>2</sub> AsO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,012	0,253	0,887	0,025	3,834	0,999

De la Tabla 15 se desprende que el anión fosfato es el que presenta mayor capacidad de adsorción (Xm) en el suelo con y sin materia orgánica, adsorbiéndose en promedio 3 veces más en la fracción inorgánica y 9 veces más en el suelo con MO, respecto a los otros aniones. A su vez, se observa que para los aniones fosfato y arsenito, el parámetro Xm aumenta al existir presencia de materia orgánica, lo que corrobora el mecanismo de adsorción propuesto para estos aniones, determinado por la presencia de complejos Al, Fe-Humus existentes. En el caso del molibdato, este presenta un máximo de adsorción mayor sobre la matriz de suelo sin MO, lo que coincide con el mecanismo de adsorción de molibdato propuesto, el cual está determinado por el rol de óxidos de Hierro y Aluminio. Por otro lado, sorprende que la adsorción del molibdato presente tan altos valores del parámetro K (30,817 y 27,175 L/mmol en suelo s-MO y suelo c-MO), el cual

es un término de afinidad e indica que la energía de enlace de éste con la superficie del suelo es alta, por lo cual el proceso de desorción no es favorecido en relación al de adsorción, presentando en el equilibrio una mayor velocidad relativa de adsorción sobre la de desorción (Mendoza, 1986). Este fenómeno se observa en las isothermas de adsorción de molibdato en ambas matrices, las cuales presentan una pendiente inicial muy pronunciada (Evangelou, 1998), alcanzando rápidamente su máximo de adsorción en comparación al fosfato y arsenito, los cuales presentan pendientes y, por ende, valores del parámetro K mucho más pequeños, lo que sugiere un enlace más débil (entre 0,5 y 4 L/mmol).

**Tabla 16.** Parámetros de Freundlich y Langmuir para las isothermas de adsorción de Cadmio en Suelo Diguillin.

Muestra	Parámetros Freundlich			Parámetros Langmuir		
	K	1/n	R <sup>2</sup>	Xm [mmol/g]	K [L/mmol]	R <sup>2</sup>
Suelo s-MO control	0,015	0,440	0,949	0,032	1,405	0,994
Suelo s-MO + H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0,088	0,453	0,886	0,070	20,959	0,997
Suelo s-MO + MoO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	0,031	0,436	0,973	0,043	10,162	0,995
Suelo s-MO + H <sub>2</sub> AsO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,036	0,361	0,96	0,048	12,607	0,994
Suelo c-MO control	0,030	0,306	0,946	0,040	14,622	0,998
Suelo c-MO + H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0,808	0,780	0,827	0,091	74,263	0,997
Suelo c-MO + MoO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	0,049	0,491	0,893	0,053	18,614	0,996
Suelo c-MO + H <sub>2</sub> AsO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,057	0,324	0,923	0,062	25,147	0,998



Los parámetros  $X_m$  obtenidos del ajuste de Langmuir para las isothermas de adsorción de cadmio, muestran que existe un incremento en la capacidad máxima de adsorción del suelo, cuando éste es tratado con los aniones fosfato, arsenito y molibdato, debido a que la presencia de estas sustancias aniónicas aumenta la capacidad de retención de los metales debido a la mayor presencia de los sitios específicos de adsorción. Por otro lado, el parámetro  $K$  de Langmuir indica que el cadmio presenta mayor afinidad por el suelo tratado con fosfato en ambas matrices, lo que se traduce en una mayor intensidad de las interacciones del adsorbato con la superficie debido a una mayor energía de enlace. Esto se corrobora con los valores del parámetro  $1/n$  obtenidos del modelo de Freundlich, el cual representa la afinidad o intensidad de adsorción entre el adsorbente y sorbato (Mejía y col, 2008), siendo mayor para las matrices tratadas con fosfato. La superficie control, en ambos casos, presenta la menor fuerza de enlace, seguida de la matriz tratada con molibdato y arsenito.

#### IV. CONCLUSIONES

La caracterización del suelo Diguillín muestra que su pH es levemente ácido, y que presenta una textura franca. Además muestra un alto contenido de materia orgánica (11,7 %), una relación alta de óxidos de silicio y aluminio, y un PIE de 2,77. Por otro lado, la eliminación de la materia orgánica genera un incremento en sus valores de pH, así como de su PIE a 7,43, debido a que los óxidos de hierro y aluminio quedan más expuestos en la superficie.

La presencia de MO en el suelo Diguillín, aumenta la adsorción de los aniones fosfato y arsenito, a través de asociaciones con complejos Al-humus y Fe-humus presentes sobre la superficie. Por otro lado, la presencia de MO no contribuye a la adsorción de molibdato, debido a que éste presenta mayor afinidad por los óxidos de Fe y Al presentes en la superficie de la fracción inorgánica del suelo, así como por minerales de tipo paracrystalinos y no cristalinos.

La considerable diferencia existente entre el fosfato adsorbido en el suelo c-MO y suelo s-MO está asociado a fenómenos independientes a la adsorción sobre la superficie, como por ejemplo el elevado contenido de fósforo en sus distintas formas presente en el suelo c-MO, o la posible precipitación de fosfato (con Fe y Ca), que puede ser interpretado como un fenómeno de adsorción.

La presencia de MO en el suelo, y los aniones fosfato, arsenito y molibdato previamente adsorbidos, favorece la adsorción de Cd, debido al aumento de cargas negativas en la superficie del suelo. De este modo, el anión fosfato genera una mayor adsorción de Cadmio en el suelo, por sobre los aniones arsenito y molibdato, ya que es adsorbido en mayor cantidad por el suelo con MO y su fracción inorgánica, siguiendo la secuencia selectiva fosfato > arsenito > molibdato.

En todos los casos estudiados, el fenómeno de adsorción de aniones y Cadmio, descrito por isoterma tipo L, fue ajustado de mejor forma por el modelo de Langmuir, lo que no implica que se cumplan todas las suposiciones que éste plantea, ya que algunas de estas hipótesis no son aplicables a sistemas complejos y heterogéneos como el suelo. La máxima capacidad de adsorción ( $X_m$ ) de los aniones sigue la secuencia fosfato > arsenito > molibdato, para ambas matrices de suelo, mientras que el parámetro que indica la fuerza de enlace entre adsorbente y sorbato ( $K$ ) presenta una secuencia molibdato > arsenito > fosfato, en el suelo c-MO, y molibdato > fosfato > arsenito en el suelo s-MO, lo que supone que una desorción de las especies en el sistema, seguiría un orden inverso. Esta secuencia es similar a la obtenida por el modelo de Freundlich al observar que el parámetro  $1/n$ , que indica afinidad del sustrato por la superficie, sigue el mismo orden.

En el caso del cadmio, hay una mayor adsorción y un incremento en la capacidad máxima de adsorción ( $X_m$ ), al tratar el suelo con los aniones fosfato, arsenito y molibdato, en relación al suelo control, para ambas matrices, corroborando la

importancia de estos aniones en la adsorción de cadmio en los suelos. Este comportamiento se repite con respecto a la constante de afinidad (K), siguiendo la misma secuencia, lo que sugiere que la desorción de cadmio se daría en mayor proporción en el suelo libre de la presencia de aniones, siguiendo el orden inverso al indicado en cada caso para los parámetros mencionados. En este caso, el modelo de Freundlich no es coincidente con el de Langmuir, ya que no presenta la misma secuencia para el parámetro de afinidad  $1/n$ .

La presencia de estos aniones, al generar un incremento en la adsorción de metales pesados, puede tener como resultado el inicio de una problemática ambiental importante, ya que la presencia de estas especies contribuye a una significativa acumulación de metales en suelos destinados al desarrollo de actividades silvoagropecuarias.

## V. REFERENCIAS

Acevedo, E.; Carrasco, M. A.; León, O.; Martínez, E.; Silva, P.; Castillo, G.; Ahumada, I.; Borie, G.; González, S., 2005. Informe Criterios de Calidad de Suelo Agrícola. Gobierno de Chile. Ministerio de Agricultura, SAG.

Adriano, D., 2001. Molybdenum. En: Trace elements in terrestrial environments. Biogeochemistry, bioavailability, and risk of metals. Segunda Edición (ed. A. Adriano). Springer-Verlag, New York. Capítulo 15, pp 587-624.

Appelt, H.; Coleman, N. T. y Pratt, P. F. 1975. Interaction between organic compounds, minerals and ions in volcanic-ash-derived soils. II Effects of organic compounds on the adsorption of phosphate. Soil Science Society of America Proceedings, **39**: 628-630.

Atkins, P. W., 1991. Adsorción en Superficies. En: Físicoquímica. Tercera edición. Oxford University Press, Walter Street, Oxford Inglaterra. pp. 900-904.

Atkinson, R. S.; Parfitt, R. L. y Smart, R. St. C, 1974. Infrared study of phosphate adsorption in goethite. J. Chem. Soc. Faraday Trans. I, **70**: 1472-1479

Barrow, N., 1978. The description of phosphate adsorption curves. J. Soil Sci. **29**: 447-462.

Barticevic, E. 1974. Punto de carga cero y distribución de cargas eléctricas en suelos derivados de cenizas volcánicas. Tesis Quim., Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Bernas B., 1968. A new method for descomposition and comprehensive analysis of silicates by atomic absorption spectrometry. *Anal. Chem.* 40: 1682-1686.

Besoain, E. y Sepúlveda, G. 1985. Mineralogía de los suelos volcánicos del Centro-sur de Chile: Minerales Primarios. En: *Suelos Volcánicos de Chile, Primera Edición* (ed. J. Tosso), Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile. Capítulo 2, pp. 153-205.

Besoain E. 1985. Los Suelos. En: *Suelos Volcánicos de Chile. Primera Edición* (ed. J. Tosso), Instituto de Investigación Agropecuaria (INIA), Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile. Capítulo 1, pp. 24-27, 29.

Besoain, M., E. 1999. Los suelos volcánicos y la fertilización fosfatada. En: *Las rocas fosfóricas y sus posibilidades de uso agrícola en Chile* (ed. E. Besoain). Colección Libros INIA N°2, INIA, Santiago, Chile. pp 328.

Birrel, K. S., 1964. Some properties of volcanic ash soils. FAO-UNESCO, Meeting on the Classification and Correlation of Soils from Volcanic Ash (Tokyo). Report, 14: 74-81.

Black, C. A. 1957. Soil Plant Relationships. Department of Agronomy. Iowa State Colle., Ames Iowa, EEUU.

Bowden, J. L.; Posner, A. M. y Quirk, J. P, 1977. Ionic adsorption on variable charge mineral surfaces. Theoretical-charge development and triturations curves. Aust. J .Soil Res. **15**: 121-136.

Briceño, T. M. A., 1994. Adsorción de Cloruro, Fosfato, y Ftalato en un suelo volcánico derivado de materiales volcánicos y su fracción inorgánica. Tesis de Pregrado. Departamento de Química. Facultad de Ciencias. Universidad de Santiago de Chile. pp. 13.

Burns, P. E.; Hyun. S.; Lee, L. S. y Murarka, I, 2006. Characterizing As(III, V) adsorption by soils surrounding ash disposal facilities. Journal Chemosphere. **63**: 1879–1891.

Cala, V., 1995. Dinámica de metales pesados en suelos. En: Contaminación y Depuración de Suelos. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid, España. Capítulo I, pp. 49-58.

Cazanga, M.; Reyes, A.; Gutiérrez, M. y Escudey, M., 2009. Impacto de la aplicación de lodos residuales en la adsorción de Metales Pesados en un suelo Andisol chileno.

Caderno de Pesquisa Sér. Bio., Santa Cruz do Sul, Vol. 21, No. 3, Sept-Dec, 2009, pp. 87-96.

Dahlgren, R. A.; Saigusa, M. y Ugolini, F. C., 2004. The nature, properties and management of volcanic soils. *Advances in Agronomy, Florida*. **82**: 113-182.

Dean, L. A., 1949. Fixation of soil phosphorus. *Adv. Agron.* **1**: 391-411.

De Meeus, C.; Eduljee, G. y Hutton, M., 2002. Assesment and Management of risks arising from exposure to cadmium in fertilisers. *The Science of the total environment*. Vol. 291. pp. 167-187.

Escudey, M. y Galindo G. 1983. *J. Colloid Interface Sci.* **93**. 78.

Escudey, M.; Galindo, G. y Ervin, J., 1986. *Clays & Clays Minerals*. **34**. 108.

Escudey M.; Galindo G.; Foster J. E.; Brinceño M.; Días P. y Chang A., 2001. Chemical forms of phosphorus of volcanic ash-derived soils in Chile. *Commun Soil SCI. Plant Anal.* **32**: 601-616.

Escudey M.; De la Fuente P.; Antilén M. y Molina M., 2010. Effect of ash from forest fires on phosphorus availability, transport, chemical forms, and content in volcanic soils. *Environ. Chem.* **7**, 1-8.



Evangelou, V. P., 1998. Sorption and Exchange Reactions. En: Environmental Soil and Water Chemistry. Principles and Applications. Wiley & Sons Publication. Capítulo 4, pp. 167-224.

Fassbender, H. W. y Bornemisza, E., 1987. Fenómenos de adsorción y cambios en suelos. En: Química de Suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José. Costa Rica. Servicio Editorial IICA. pp. 137.

Goldberg, S.; Scott, M.L. y Suarez, D.L. 2002. Predicting molybdenum adsorption by soils 155 using chemical parameters in the constant capacitance model. Soil Science Society of America Journal, **66**: 1836-1842.

Hemwall, J. B, 1957. The fixation of phosphorus by soils. Adv. Agron. **9**: 95-112.

Hingston, F. J.; Posner, A. M. y Quirk, J. P, 1967. Specific adsorption of anions. Nature **215**: 1459-1461.

Hirade, S. y Uchida, N. 2004. Effects of soil organic matter on pH-dependent phosphate sorption by soils. Soil Science and Plant Nutrition, **50**: 665-675.

Hunter, R. J. 1981. Zeta Potential in Colloid Science: Principles and Applications. Academic Press, London.

INE. 1998. VI Censo Nacional Agropecuario 1997. INE, Santiago, Chile, pp. 214.

Irving, H. M. N. H. y Williams, R. J. P., 1953. The stability of transition-metal complexes. J. Chem. Soc.: 3192–3210.

IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos N° 103. FAO, Roma.

Jarrel, W. N. y Dawson. M. D., 1978. Sorption y availability of molybdenum in soils Western Oregon. Soil Science Society America Journal. **42**: 412-415.

Jimenez, V. G., 1999. Especiación de Arsénico en suelos contaminados tras el accidente minero de Aznalcollar. Memoria Master Experimental en Química. Universidad de Barcelona. Barcelona. España. pp. 83.

Karimian, N. y Cox, F., 1978. Adsorption and extractability of molybdenum in relation to some chemical properties of soil. Soil Science Society of America Journal, **42**: 757-761.

McBride M. B., 1994. Organic Pollutants in Soil. En: Environmental Chemistry of Soils. (ed Murray B. McBride). Oxford University Press, Inc, New York, USA. pp. 344.

McBride M. B., 1994. Soil Acidity. En: Environmental Chemistry of Soils. (ed Murray B. McBride). Oxford University Press, Inc, New York, USA. pp. 169-172.

McBride, M. B., 2005. Molybdenum and copper uptake by forage grasses and legumes grown on a metal-contaminated sludge site. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **36**: 2489-2501.

Mejía, Z. F.; Valenzuela, G. J. L.; Aguayo, S. S. y Meza, F. D., 2009. Adsorción de arsénico en Zeolita natural pretratada con óxidos de Magnesio. *Rev. Int. Contam. Ambient.* **25**: 217-227.

Mella, A, y Kühne, A., 1985. Sistemática y descripción de las Familias, Asociaciones y Series de suelos derivados de materiales piroclásticos de la zona central-sur de Chile. En: *Suelos Volcánicos de Chile, Primera Edición* (ed J. Tosso), Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile. Capítulo 8, pp. 552, 586, 587.

Mendoza, R. E., 1986. Isotermas de adsorción de Fósforo en suelos argentinos. I. Métodos de ajuste y comparación entre ecuaciones. *Ciencia del Suelo*. Volumen N°2. **10**: 107-116.

Miyake, M., 1979. Phosphate sorption by Indonesian paddy soils. *JARQ*. **13**: 145-148.

Mizota, C., 1977. Phosphate fixation by ando soils diferents in their clay mineral composition. *Soil Sci. Plant Nutr.* **23**: 311-318.

Mora, M.L. y Canales J., 1995a. Humín-clay interaction on surface reactivity in Chilean Andisols. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **26**: 2819-2828.

Mora, M.L. y Canales J., 1995b. Interactions of humic substances with allophanic compounds. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **26**: 2805-2817.

Nriagu, J. O., y Pacyna, J. M., 1988. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, wáter and soils by trace mtals. *Nature*. **333**: 134-139.

Parfitt, R. L. y Russell, J. D, 1977. Adsorption on hydrous oxides. IV. Mechanism of adsorption of various ions on goethite. *J. Soil. Sci.* **28**: 297-305.

Peralta, M., 1979. Los suelos forestales de Chile. Charlas y Conferencias N°5. Universidad Central de Chile. Facultad de Ingeniería Forestal. pp. 16-30.

Rajan, S. S. S.; Perrott, K. W. y Saunders, W. M. H., 1974. Identification of phosphate reactive sites of hydrous alumina from proton consumption during phosphate adsorption at constant pH values. *J. Soil. Sci*, **25**: 438-447.

Ryden, J. C. y Syers, J. K., 1975. Charge relationship of phosphate sorption. *Nature* **255**: 51-53.

Ryden, J. C.; McLaughlin J. R.; y Syers J. K., 1977. Time-dependent sorption of phosphate by soils and hydrous ferric oxides. *J. Soil Sci.* **28**: 585-595.

Sadzawka, M. A.; Melendez, E. y Aomine, S. 1972. The pH of Chilean volcanic ash soils "Trumaos". *Soil Sci. Plant Nutr.* **18**: 191-197.

Sadzawka, M. A. y Carrasco M. A., 1985. Fósforo. En: *Suelos Volcánicos de Chile. Primera Edición* (ed. J. Tosso), Instituto de Investigación Agropecuaria (INIA), Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile. Capítulo 4. pp. 382.

Sadzawka, R. A. y L. Porte O. 1985. Aluminio activo y hierro en suelos volcánicos. *Agricultura Técnica (Chile)* **45(4)**:329-334.

Sadzawka R., 2004. Angélica. *Métodos de Análisis de Suelos*. Instituto de Investigación Agropecuarias, Serie la Platina N° 16. pp. 15, 17-18, 95-96, 107-118.

Saunders, W. M. H, 1959a. Effect of phosphate topdressing on a soil from anisitic volcanic ash. II. Effect of distribution of phosphorus and on related chemical properties. N. J. C. Agric. Res. 2: 445-462.

Saunders, W. M. H, 1959b. Effect of phosphate topdressing on a soil from anisitic volcanic ash. III. Phosphate retention and pH. N. J. C. Agric. Res. 2: 659-665.

Shoji, S.; Dahlgren R. y Nanzyo M., 1993. Genesis of volcanic ash soils. En: Vulcanic ash soils: Genesis, properties and utilization. Developments in Soil Science 21. Elsevier. Amsterdam. pp. 37-71.

Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, 2004. Comisión de Normalización y Acreditación. 7: 52-54.

Sparks, D. L., 1995. Sorption Fenomena on Soils. En: Environmental Soil Chemistry. Academic Press, Inc. San Diego, California. USA. Chapter 5. pp. 103.

USDA, 2006. Claves para la Taxonomía de los suelos. Soil Survey Staff. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio de conservación de Recursos Naturales. Decima Edición. pp 77, 159. Disponible en [http://soils.usda.gov/technical/classification/tax\\_keys/](http://soils.usda.gov/technical/classification/tax_keys/).

Wada, K., 1959. Reaction of phosphate with allophone and halloysite. *Soil Sci.* **87**: 352-330.

Wada, S. I. y Wada, K., 1980. Formation, composition and structure of hydroxy-aluminosilicate ions. *J. Soil Sci.*, **31**: 457-467.

Wada, K., 1985. The distinctive properties of Andosols. *Advances in Agronomy.* **2**: 173-229.

Yekini, B., 1970. Interactions of orthophosphate with iron-oxi-hidroxide minerals found in soils. Ph. D. Thesis, University of Florida, USA.

Yuan, G. y Lavkulich, L.M., 1994. Phosphate sorption in relation to extractable iron and aluminium in spodosols. *Soil Science Society of America Journal*, **58**: 343-346.

Zhang, P. C. y Spark., D. L., 1989. Kinetics and mechanism of molybdate adsorption/desorption at the goethite/water interfase using pressure-jump relaxation. *Soil Science Society of America Journal.* **53**: 1028-1034.

Zhu, J; Pigna, M; Cozzolino, V; Caporale, A. G. y Violante. A., 2011. Sorption of arsenite and arsenate on ferrihydrite: Effect of organic and inorganic ligands. *Journal of Hazardous Materials.* **189**: 564-571.

## **VI. ANEXOS**



## 6.1. ANEXO I. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO DIGUILLÍN C-MO Y S-MO

### - pH y Conductividad Eléctrica

**Tabla 17.** pH y CE de la muestra y duplicado del suelo c-MO.

	Muestra			Duplicado		
	pH	CE (ds/cm)	T° (°C)	pH	CE (ds/cm)	T° (°C)
<b>H2O</b>	5,80	0,69	22,6	6,00	0,60	22,3
<b>KCl</b>	4,79	...	24,2	4,81	...	24,1
<b>CaCl2</b>	5,18	...	24	5,22	...	23,9

**Tabla 18.** pH y CE de la muestra y duplicado del suelo s-MO.

	Muestra			Duplicado		
	pH	CE (ds/cm)	T° (°C)	pH	CE (ds/cm)	T° (°C)
<b>H2O</b>	6,37	0,60	21,4	6,36	0,62	21,5
<b>KCl</b>	5,52	...	21,6	5,54	...	21,7
<b>CaCl2</b>	6,00	...	21,5	5,90	...	21,6

### - Porcentaje de Humedad y Factor de Humedad

El porcentaje de humedad y factor de humedad se determinaron según las ecuaciones 5 y 6 respectivamente.

$$H (\%) = (a-b / b-c) \times 100 \quad \text{Ec. 5}$$

$$fh = (H (\%) + 100) / 100 \quad \text{Ec. 6}$$

**Tabla 19.** Porcentaje de Humedad (%) y Factor de Humedad (fh) de la muestra y duplicado del suelo c-MO

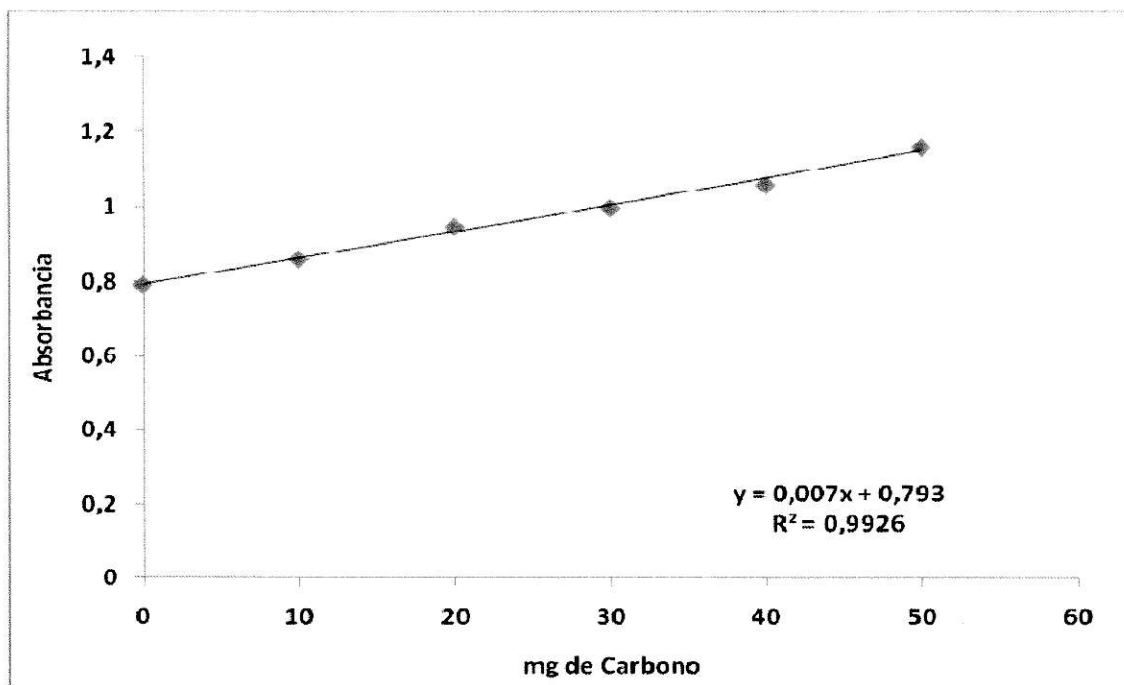
	<b>Muestra</b>	<b>Duplicado</b>
<b>Masa Suelo</b>	10,8397 g	12,6866 g
<b>Masa Vaso ( c)</b>	11,7701 g	11,2152 g
<b>Masa Suelo+Vaso (a)</b>	22,6098 g	23,9018 g
<b>Masa Suelo+Vaso Seco (105°C)</b>	21,1923 g	22,2599 g
<b>(b)</b>		
<b>Masa Suelo Seco</b>	9,4222 g	11,0447 g
<b>Humedad (%)</b>	<b>15,0443</b>	<b>14,866</b>
<b>Fh</b>	<b>1,15044</b>	<b>1,1487</b>

**Tabla 20.** Porcentaje de Humedad (%) y Factor de Humedad (fh) de la muestra y duplicado del suelo s-MO

	<b>Muestra</b>	<b>Duplicado</b>
<b>Masa Suelo</b>	10,5924	10,6175
<b>Masa Vaso ( c)</b>	25,7718	34,2520
<b>Masa Suelo+Vaso (a)</b>	36,3642	44,8695
<b>Masa Suelo+Vaso Seco (105°C)</b>	34,6572	43,0490
<b>(b)</b>		
<b>Masa Suelo Seco</b>	8,88540	8,7970
<b>Humedad (%)</b>	<b>19,2113</b>	<b>20,6946</b>
<b>Fh</b>	<b>1,1921</b>	<b>1,2069</b>

#### **- Determinación de MO**

Los mg de carbono en las muestras de suelo se determinaron a partir de la curva de calibración (Fig. 30), elaborada con una serie de estándares. Las muestras presentaban absorbancias que escapaban del rango de la curva elaborada, por lo cual se diluyó en una proporción 1:2.



**Figura 30.** Curva de calibración de absorbancia en función de los mg de carbono.

**Tabla 21.** Absorbancia de la muestra y duplicado de las muestras de suelo c-MO.

	<b>Muestra</b>	<b>Duplicado</b>
<b>Absorbancia (Dil 1:2)</b>	0,792	0,798
<b>Absorbancia</b>	1,584	1,595
<b>mg de Carbono</b>	112,94	114,55

El contenido de carbono orgánico del suelo Diguillín se determinó a partir de la ecuación 7.

$$C \text{ org (\%)} = (a - b / 10 s) \times 1,16 \quad \text{Ec.7}$$

donde:

a = mg de C en la muestra

b = mg promedio de C en los blancos

s = masa muestra (g)

1,16 = factor de relación con el método de titulación (Walkley y Black)

El contenido de MO en el suelo Diguillín se determinó a partir de la ecuación 8.

$$\text{MO (\%)} = \text{C org} \times 1,724$$

Ec.8

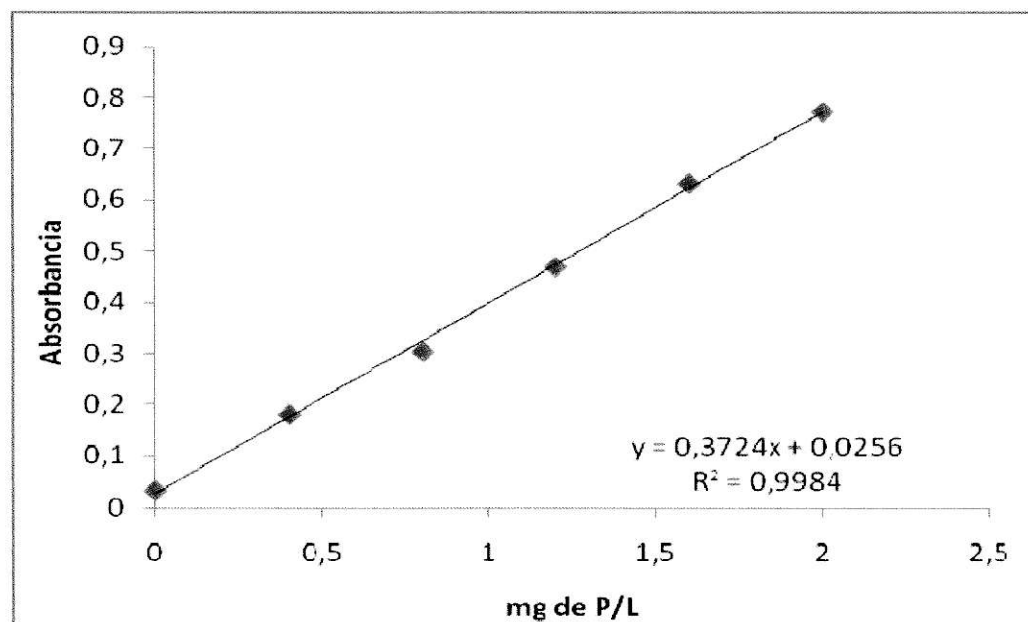
donde 1,724 corresponde a un factor empírico.

**Tabla 22.** Absorbancia y mg de carbono en el suelo c-MO.

	<b>Muestra</b>	<b>Duplicado</b>	<b>Blanco 1</b>	<b>Blanco 2</b>
<b>mg de Carbono</b>	112,94	114,55	0	0,017
<b>Masa (g)</b>	1,97	1,92	--	--
<b>C org (%)</b>	6,65	6,92	--	--
<b>MO (%)</b>	11,46	11,93	--	--

#### - Determinación de Fósforo Extraíble

El contenido de fósforo disponible, en mg/L de extracto, se obtiene a partir de una curva de calibración (Fig. 31) elaborada a partir de una serie de estándares de fósforo.



**Figura 31.** Curva de calibración de absorbancia en función del contenido de fósforo (mg P/L).

El contenido de fósforo por kilogramo de suelo se determinó a partir de la ecuación 9.

$$P \text{ (mg/kg)} = (a - b) \times 20 \times fh \quad \text{Ec. 9}$$

donde a: mg/L de P en el extracto de la muestra

b: mg/L de P en el blanco

20: relación líquido:suelo

fh: factor de corrección por humedad

**Tabla 23.** Contenido de Fósforo en los suelos c-MO y s-MO.

	Suelo c-MO		Suelo s-MO		Blanco
	Muestra	Duplicado	Muestra	Duplicado	
<b>Absorbancia</b>	0,2570	0,2603	0,0334	0,0347	0
<b>P (mg/L)</b>	0,6215	0,6303	0,0210	0,0244	0
<b>fh</b>	1,1504	1,1487	1,1921	1,2069	--
<b>P (mg/kg)</b>	14,30	14,48	0,50	0,59	0

#### - Determinación del Punto Isoeléctrico (PIE)

Para determinar el PIE de las muestras, fue necesario determinar una serie de parámetros, presentados en la tabla 24 y 25, para finalmente obtener la gráfica Potencial Zeta (PZ) en función del pH, donde el PZ se obtiene de la ecuación 10.

$$PZ = (13,5 \times 1600 \times FC) / (t_{prom} \times V) \quad \text{Ec. 10}$$

donde 13,5 y 1600 son constantes empíricas

FC: Factor de corrección, dependiente de la temperatura

$t_{prom}$ : tiempo promedio de migración de las partículas

V: Voltaje

**Tabla 24.** Parámetros para determinar el PIE del Suelo c-MO.

<b>pH</b>	<b>t<sub>prom</sub></b>	<b>Voltaje</b>	<b>Temp. Promedio (°C)</b>	<b>Factor Correccion</b>	<b>PZ</b>
2,53	34,98	100	24,55	0,9604	5,9312
2,645	55,94	100	24,45	0,9622	3,7153
3,06	51,65	100	23,75	0,9747	-4,0764
3,41	19,30	100	22,80	0,9926	-11,1092
4,4	9,78	100	22,75	0,9936	-21,9556
5,135	9,08	100	20,95	1,0301	-24,5173
5,695	9,78	100	21,20	1,0248	-22,6454
6,1	6,01	100	22,00	1,0084	-36,2267
7,14	3,93	100	22,45	0,9994	-55,0013
7,6	3,66	100	22,70	0,9946	-58,6554
7,85	3,15	100	22,95	0,9897	-67,8680

**Tabla 25.** Parámetros para determinar el PIE del Suelo s-MO.

<b>pH</b>	<b>t<sub>prom</sub></b>	<b>Voltaje</b>	<b>Temp. Promedio (°C)</b>	<b>Factor Correccion</b>	<b>PZ</b>
3,115	15,95	100	24,00	0,9702	13,1386
3,495	9,45	100	23,85	0,9729	22,2380
3,95	11,68	100	23,45	0,9803	18,1365
4,7	13,55	100	22,90	0,9907	15,7927
5,755	14,65	100	21,90	1,0104	14,8975
5,955	15,05	100	22,90	0,9907	14,2187
6,325	18,83	100	22,90	0,9907	11,3674
6,77	23,35	100	23,15	0,9859	9,1204
7,18	29,83	100	23,30	0,9831	7,1199
7,65	32,10	100	23,55	0,9784	-6,5838
8,715	19,38	100	23,75	0,9747	-10,8668

## 6.2. ANEXO 2. CINÉTICA DE ADSORCIÓN

**Tabla 26.** Datos cinética de adsorción de fosfato.

Tiempo [horas]	Conc. Ofrecida [mg/L]	Conc. Equilibrio [mg/L]	Conc. Adsorbida [mg/L]	% Adsorbido
0	981,00	981,00	0	0
0,5	981,00	568,59	412,41	42,04
2	981,00	484,22	496,78	50,64
4	981,00	412,41	568,59	57,96
8	981,00	349,33	631,67	64,39
16	981,00	333,83	647,17	65,97

**Tabla 27.** Datos cinética de adsorción de arsenito.

Tiempo [horas]	Conc. Ofrecida [mg/L]	Conc. Equilibrio [mg/L]	Conc. Adsorbida [mg/L]	% Adsorbido
0	815,00	815,00	0	0
0,5	815,00	578,73	236,27	28,99
2	815,00	529,99	285,01	34,97
4	815,00	503,75	311,25	38,19
8	815,00	488,76	326,24	40,03
16	815,00	481,26	333,74	40,95

**Tabla 28.** Datos cinética de adsorción de molibdato.

Tiempo [horas]	Conc. Ofrecida [mg/L]	Conc. Equilibrio [mg/L]	Conc. Adsorbida [mg/L]	% Adsorbido
0	934,00	934,00	0	0
0,5	934,00	822,01	111,97	11,99
2	934,00	788,48	145,52	15,58
4	934,00	762,89	171,11	18,32
8	934,00	729,27	204,73	21,92
16	934,00	700,5	233,50	25,00

**Tabla 29.** Datos cinética de adsorción de cadmio.

<b>Tiempo [horas]</b>	<b>Conc. Ofrecida [mg/L]</b>	<b>Conc. Equilibrio [mg/L]</b>	<b>Conc. Adsorbida [mg/L]</b>	<b>% Adsorbido</b>
0	998,00	998,00	0	0
0,5	998,00	658,58	339,42	34,01
2	998,00	568,66	429,34	43,02
4	998,00	495,61	502,39	50,34
8	998,00	443,91	554,09	55,52
16	998,00	423,65	574,35	57,55



### 6.3. ANEXO 3. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

**Tabla 30.** Datos Isoterma de adsorción de fosfato en Suelo c-MO (muestra).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
1,0099	6,17	0,0000	0,0	0,0000	0,0000	0,0000
1,0066	6,45	0,9804	11,0	0,1158	0,8646	0,0086
1,0047	6,60	3,3918	50,9	0,5358	2,8560	0,0284
1,0032	6,58	5,7010	129,0	1,3579	4,3431	0,0433
1,0045	6,68	10,1134	327,0	3,4421	6,6713	0,0664
1,0034	6,76	30,7216	1350,0	14,2105	16,5111	0,1646
1,0008	6,89	50,0000	3110,0	32,7368	17,2632	0,1725
1,0049	6,93	72,8870	6400,0	67,3684	5,5182	0,0549

**Tabla 31.** Datos Isoterma de adsorción de fosfato en Suelo c-MO (Duplicado).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
0,9996	6,17	0,0000	0,0	0,0000	0,0000	0,0000
1,0015	6,44	0,9804	12,3	0,1292	0,8513	0,0085
1,0022	6,61	3,3918	50,2	0,5280	2,8637	0,0286
0,9998	6,71	5,7010	128,3	1,3502	4,3508	0,0435
1,0088	6,78	10,1134	878,3	9,2449	0,8685	0,0086
1,0045	6,81	30,7216	1332,7	14,0283	16,6933	0,1662
1,0071	6,94	50,0000	3342,7	35,1862	14,8138	0,1471
1,0059	7,11	72,8866	6262,7	65,9231	6,9635	0,0692

**Tabla 32.** Datos Isoterma de adsorción de fosfato en Suelo s-MO (muestra).

<b>Masa suelo seco [g]</b>	<b>pH</b>	<b>Conc. ofrecida [mmol/L]</b>	<b>Conc. equilibrio [mg / L]</b>	<b>Conc. Equilibrio [mmol/L]</b>	<b>Conc. adsorbida [mmol/L]</b>	<b>Conc. adsorbida [mmolads/g]</b>
0,9997	6,32	0,0000	0,0	0,0000	0,0000	0,0000
0,9917	6,47	0,9804	9,3	0,0955	0,8849	0,0089
1,0021	6,51	3,3918	46,0	0,4742	2,9175	0,0291
1,0064	6,58	5,7010	125,0	1,2887	4,4124	0,0438
0,9917	6,60	10,1134	302,0	3,1134	7,0000	0,0706
1,0058	6,73	30,7216	2340,0	24,1237	6,5979	0,0656
0,9918	6,84	50,0000	4210,0	43,4021	6,5979	0,0665
1,0000	6,97	72,8866	6450,0	66,4949	6,3918	0,0639

**Tabla 33.** Datos Isoterma de adsorción de fosfato en Suelo s-MO (duplicado).

<b>Masa suelo seco [g]</b>	<b>pH</b>	<b>Conc. ofrecida [mmol/L]</b>	<b>Conc. equilibrio [mg / L]</b>	<b>Conc. Equilibrio [mmol/L]</b>	<b>Conc. adsorbida [mmol/L]</b>	<b>Conc. adsorbida [mmolads/g]</b>
1,0099	6,31	0,0000	0,0	0,0000	0,0000	0,0000
1,0080	6,34	0,9804	13,0	0,1368	0,8436	0,0084
1,0051	6,42	3,3918	30,1	0,3168	3,0749	0,0306
1,0053	6,46	5,7010	118,0	1,2421	4,4589	0,0444
1,0043	6,51	10,1134	335,0	3,5263	6,5871	0,0656
1,0079	6,59	30,7216	2440,0	25,6842	5,0374	0,0500
1,0031	6,68	50,0000	4050,0	42,6316	7,3684	0,0735
0,9934	6,74	72,8866	6630,0	69,7895	3,0971	0,0312

**Tabla 34.** Datos Isoterma de adsorción de arsenito en Suelo c-MO (muestra).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
1,001	6,29	0,0000	0,0	0,0000	0,0000	0,0000
0,9939	6,01	0,8800	16,8	0,1344	0,7456	0,0075
1,0067	6,32	3,4960	210,0	1,6800	1,8160	0,0180
0,9913	6,51	5,6800	417,0	3,3360	2,3440	0,0236
0,9916	6,57	6,5200	512,0	4,0960	2,4240	0,0244
1,0079	7,00	13,6000	1380,0	11,0400	2,5600	0,0254
1,0158	7,50	20,4800	2220,0	17,7600	2,7200	0,0268
1,0033	7,90	34,9600	4070,0	32,5600	2,4000	0,0239

**Tabla 35.** Datos Isoterma de adsorción de arsenito en Suelo c-MO (duplicado).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
1,0478	6,27	0,0000	0,0	0,0000	0,0000	0,0000
1,0215	6,00	0,8800	12,6	0,1008	0,7792	0,0076
1,0624	6,39	3,4960	198,0	1,5840	1,9120	0,0180
1,0434	6,47	5,6800	368,0	2,9440	2,7360	0,0262
1,0476	6,57	6,5200	455,0	3,6400	2,8800	0,0275
1,0311	7,20	13,6000	1320,0	10,5600	3,0400	0,0295
1,0075	7,70	20,4800	2190,0	17,5200	2,9600	0,0294
1,0570	8,31	34,9600	3700,0	29,6000	5,3600	0,0507

**Tabla 36.** Datos Isoterma de adsorción de arsenito en Suelo s-MO (muestra).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
1,0017	6,36	0,0000	0,0	0,0000	0,0000	0,0000
1,0101	6,01	0,8800	25,5	0,2040	0,6760	0,0067
1,012	6,40	3,4960	204,7	1,6376	1,8584	0,0184
1,0488	6,61	7,9800	447,7	3,5816	4,3984	0,0419
1,0508	6,60	8,5100	547,0	4,3760	4,1340	0,0393
1,0013	7,57	13,6000	1400,0	11,2000	2,4000	0,0240
1,0125	7,98	20,4800	2260,0	18,0800	2,4000	0,0237
1,0578	8,51	34,9600	4047,0	32,3760	2,5840	0,0244

**Tabla 37.** Datos Isoterma de adsorción de arsenito en Suelo s-MO (duplicado).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
1,0556	6,31	0,0000	0,0	0,0000	0,0000	0,0000
1,0376	6,00	0,8800	22,4	0,1792	0,7008	0,0068
1,0052	6,41	3,4960	231,0	1,8480	1,6480	0,0164
1,0295	6,61	5,6800	469,0	3,7520	1,9280	0,0187
1,0438	6,63	6,5200	569,0	4,5520	1,9680	0,0189
1,0023	7,02	13,6000	1390,0	11,1200	2,4800	0,0247
1,0249	7,61	20,4800	2230,0	17,8400	2,6400	0,0258
1,0571	8,04	34,9600	3820,0	30,5600	4,4000	0,0416

**Tabla 38.** Datos Isoterma de adsorción de molibdato en Suelo c-MO (muestra).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
1,0033	6,36	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
0,9915	6,17	0,8500	55,4	0,3463	0,5036	0,0051
0,9986	6,21	3,0438	304,6	1,9038	1,1399	0,0114
0,9923	6,25	4,4500	529,6	3,3101	1,1399	0,0115
1,0003	6,30	5,8375	704,6	4,4038	1,4336	0,0143
1,0019	6,37	8,1250	1070,0	6,6875	1,4375	0,0143
1,0088	6,67	17,1875	2460,0	15,3750	1,8125	0,0180
1,0015	6,71	28,1875	788,6	4,9288	23,2586	0,2322

**Tabla 39.** Datos Isoterma de adsorción de molibdato en Suelo c-MO (duplicado).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
1,0052	6,34	0,0000	0,0	0,0000	0,0000	0,0000
1,0099	6,17	0,8500	63,8	0,3988	0,4513	0,0045
1,0025	6,21	3,0438	353,0	2,2062	0,8375	0,0084
0,9986	6,24	4,4500	586,0	3,6625	0,7875	0,0079
0,9974	6,27	5,8375	789,0	4,9313	0,9063	0,0091
0,9973	6,36	8,1250	1150,0	7,1875	0,9375	0,0094
1,0099	6,70	17,1875	2590,0	16,1875	1,0000	0,0099
0,9911	6,80	28,1875	4340,0	27,1250	1,0625	0,0107

**Tabla 40.** Datos Isoterma de adsorción de molibdato en Suelo s-MO (muestra).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
0,9902	6,40	0,0000	0,0	0,0000	0,0000	0,0000
0,993	6,21	0,8500	13,1	0,0819	0,7681	0,0077
0,9943	6,25	3,0438	217,0	1,3563	1,6875	0,0170
1,0005	6,31	4,4500	407,0	2,5438	1,9063	0,0191
1,0099	6,41	5,8375	650,0	4,0625	1,7750	0,0176
0,9933	6,43	8,1250	1040,0	6,5000	1,6250	0,0164
0,9901	6,76	17,1875	2530,0	15,8125	1,3750	0,0139
1,0099	7,30	28,1875	4320,0	27,0000	1,1875	0,0118

**Tabla 41.** Datos Isoterma de adsorción de molibdato en Suelo s-MO (duplicado).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
1,0099	6,41	0,0000	0,0	0,0000	0,0000	0,0000
0,9943	6,20	0,8500	13,2	0,0826	0,7674	0,0077
0,9944	6,25	3,0438	197,3	1,2332	1,8106	0,0182
0,9963	6,33	4,4500	383,3	2,3957	2,0543	0,0206
0,9903	6,50	5,8375	640,3	4,0019	1,8356	0,0185
0,9912	6,83	8,1250	998,0	6,2375	1,8875	0,0190
0,9911	6,91	17,1875	2480,0	15,5000	1,6875	0,0170
0,9965	7,30	28,1875	3998,1	24,9881	3,1994	0,0321

**Tabla 42.** Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo c-MO control (muestra).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
0,9933	5,31	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
1,0146	5,44	0,0536	0,14	0,0013	0,0524	0,0005
1,0049	5,40	0,4297	0,39	0,0035	0,4262	0,0042
1,0054	5,31	0,8772	2,63	0,0234	0,8538	0,0085
0,9994	5,25	2,0996	13,29	0,1182	1,9814	0,0198
1,0047	5,21	3,7989	63,96	0,5690	3,2299	0,0321
1,0123	5,17	5,6673	239,96	2,1349	3,5324	0,0349
1,0041	5,14	7,6868	450,96	4,0121	3,6747	0,0366
1,0201	5,11	8,8790	588,96	5,2399	3,6391	0,0357

**Tabla 43.** Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo c-MO control (duplicado).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
0,9987	5,31	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
0,9937	5,44	0,0536	0,11	0,0010	0,0527	0,0005
1,0052	5,40	0,4297	0,30	0,0027	0,4270	0,0042
0,9963	5,31	0,8772	2,03	0,0180	0,8592	0,0086
1,0125	5,25	2,0996	10,20	0,0907	2,0089	0,0198
0,9999	5,21	3,7989	49,10	0,4368	3,3621	0,0336
1,0311	5,17	5,6673	183,69	1,6343	4,0329	0,0391
1,0005	5,14	7,6868	385,70	3,4315	4,2554	0,0425
1,0096	5,11	8,8790	503,69	4,4813	4,3977	0,0436

**Tabla 44.** Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo c-MO + fosfato (muestra).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
0,9942	5,63	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
1,0160	5,59	0,0536	0,02	0,0002	0,0535	0,0005
0,9985	5,47	0,4297	0,14	0,0013	0,4285	0,0043
1,0026	5,38	0,8772	0,19	0,0017	0,8755	0,0087
1,0034	5,29	2,0996	0,63	0,0056	2,0940	0,0209
0,9902	5,23	3,7989	0,80	0,0071	3,7918	0,0383
0,9986	5,21	5,6673	1,78	0,0158	5,6514	0,0566
1,0219	5,17	7,6868	8,25	0,0734	7,6134	0,0745
1,0445	5,15	8,8790	21,19	0,1885	8,6905	0,0832

**Tabla 45.** Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo c-MO + fosfato (duplicado).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
0,9980	5,63	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
0,9961	5,59	0,0536	0,06	0,0005	0,0531	0,0005
1,0008	5,47	0,4297	0,17	0,0015	0,4282	0,0043
1,0000	5,38	0,8772	0,21	0,0019	0,8754	0,0088
1,0001	5,29	2,0996	0,55	0,0049	2,0947	0,0209
1,0028	5,23	3,7989	0,68	0,0060	3,7929	0,0378
1,0280	5,21	5,6673	1,37	0,0122	5,6551	0,0550
1,0241	5,17	7,6868	6,40	0,0569	7,6299	0,0745
1,0146	5,15	8,8790	16,25	0,1446	8,7344	0,0861



**Tabla 46.** Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo c-MO + arsenito (muestra).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
1,0199	5,31	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
0,9924	5,29	0,0536	0,05	0,0004	0,0532	0,0005
0,9985	5,28	0,4297	0,15	0,0013	0,4284	0,0043
1,0102	5,19	0,8772	0,37	0,0033	0,8739	0,0087
1,0027	5,17	2,0996	1,33	0,0118	2,0878	0,0208
1,0119	5,15	3,7989	16,53	0,1471	3,6519	0,0361
1,0019	5,11	5,6673	89,23	0,7939	4,8734	0,0486
1,0027	5,10	7,6868	325,23	2,8935	4,7933	0,0478
1,0134	5,08	8,8790	466,23	4,1479	4,7310	0,0467

**Tabla 47.** Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo c-MO + arsenito (duplicado).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
0,996	5,31	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
0,9932	5,29	0,0536	0,04	0,0004	0,0533	0,0005
1,0078	5,28	0,4297	0,12	0,0011	0,4286	0,0043
1,0287	5,19	0,8772	0,29	0,0026	0,8746	0,0085
1,0141	5,17	2,0996	1,02	0,0091	2,0906	0,0206
0,9943	5,15	3,7989	12,72	0,1132	3,6858	0,0371
0,9965	5,11	5,6673	45,52	0,4050	5,2623	0,0528
1,0021	5,10	7,6868	96,42	0,8578	6,8290	0,0681
0,9984	5,08	8,8790	250,52	2,2288	6,6502	0,0666

**Tabla 48.** Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo c-MO + molibdato (muestra).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
0,9978	5,39	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
0,9925	5,31	0,0536	0,07	0,0006	0,0530	0,0005
1,0213	5,25	0,4297	0,72	0,0064	0,4233	0,0041
1,0120	5,19	0,8772	1,72	0,0153	0,8619	0,0085
0,9952	5,16	2,0996	4,01	0,0357	2,0640	0,0207
1,0214	5,11	3,7989	38,12	0,3392	3,4598	0,0339
0,9925	5,09	5,6672	92,82	0,8258	4,8415	0,0488
0,9927	5,09	7,6868	322,22	2,8667	4,8201	0,0486
1,0195	5,06	8,8790	474,22	4,2190	4,6600	0,0457

**Tabla 49.** Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo c-MO + molibdato (duplicado).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
0,9900	5,39	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
0,9941	5,31	0,0536	0,05	0,0004	0,0532	0,0005
1,0029	5,25	0,4297	0,57	0,0050	0,4247	0,0042
1,0003	5,19	0,8772	1,32	0,0117	0,8655	0,0087
1,0169	5,16	2,0996	3,08	0,0274	2,0722	0,0204
1,0630	5,11	3,7989	29,29	0,2606	3,5383	0,0333
0,9998	5,09	5,6673	71,29	0,6343	5,0330	0,0503
1,0002	5,09	7,6868	147,89	1,3158	6,3711	0,0637
1,0012	5,06	8,8790	363,89	3,2375	5,6415	0,0563

**Tabla 50.** Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo s-MO control (muestra).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
0,9946	5,40	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
1,0004	5,43	0,0536	2,71	0,0241	0,0295	0,0003
1,0008	5,37	0,4297	10,37	0,0923	0,3375	0,0034
0,9948	5,33	0,8772	27,02	0,2404	0,6368	0,0064
1,0176	5,29	2,0996	84,96	0,7559	1,3438	0,0132
1,0445	5,27	3,7989	203,09	1,8069	1,9921	0,0191
1,0336	5,23	5,6673	367,30	3,2678	2,3995	0,0232
1,0167	5,20	7,6868	569,23	5,0643	2,6225	0,0258
1,0200	5,19	8,8790	714,52	6,3569	2,5221	0,0247

**Tabla 51.** Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo s-MO control (duplicado).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
1,0169	5,40	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
1,0089	5,43	0,0536	1,21	0,0108	0,0429	0,0004
1,0007	5,37	0,4297	8,50	0,0756	0,3541	0,0035
1,0058	5,33	0,8772	21,44	0,1908	0,6865	0,0068
1,0044	5,29	2,0996	70,60	0,6281	1,4715	0,0147
0,9990	5,27	3,7989	174,64	1,5537	2,2452	0,0225
0,9963	5,23	5,6672	302,73	2,6933	2,9739	0,0298
1,0015	5,20	7,6868	495,12	4,4050	3,2819	0,0328
1,0100	5,19	8,8790	657,99	5,8540	3,0250	0,0300

**Tabla 52.** Datos Isotherma de adsorción de cadmio en Suelo s-MO + fosfato (muestra).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
1,0133	5,57	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
1,0082	5,40	0,0536	0,01	0,0001	0,0536	0,0005
1,0509	5,35	0,4297	0,02	0,0002	0,4295	0,0041
1,0114	5,30	0,8772	0,59	0,0053	0,8720	0,0086
0,9918	5,25	2,0996	1,04	0,0093	2,0904	0,0211
1,0125	5,20	3,7989	3,55	0,0316	3,7673	0,0372
1,0224	5,15	5,6673	69,19	0,6156	5,0517	0,0494
1,0137	5,14	7,6868	230,19	2,0480	5,6389	0,0556
1,0448	5,13	8,8790	350,79	3,1209	5,7581	0,0551

**Tabla 53.** Datos Isotherma de adsorción de cadmio en Suelo s-MO + fosfato (duplicado).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
0,9987	5,57	0,0000	0,000	0,0000	0,0000	0,0000
1,0019	5,40	0,0536	0,009	0,0001	0,0536	0,0005
1,0035	5,35	0,4297	0,182	0,0016	0,4281	0,0043
0,9928	5,30	0,8772	0,456	0,0041	0,8732	0,0088
1,0024	5,25	2,0996	0,796	0,0071	2,0926	0,0209
1,0006	5,20	3,7989	2,729	0,0243	3,7747	0,0377
1,0010	5,15	5,6673	6,999	0,0623	5,6050	0,0560
1,0052	5,14	7,6868	23,419	0,2084	7,4785	0,0744
1,0000	5,13	8,8790	52,849	0,4702	8,4088	0,0841

**Tabla 54.** Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo s-MO + arsenito (muestra).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
0,9996	5,39	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
0,9946	5,41	0,0536	0,43	0,0038	0,0498	0,0005
1,0179	5,33	0,4297	0,54	0,0048	0,4249	0,0042
1,0034	5,27	0,8772	2,47	0,0220	0,8552	0,0085
1,0253	5,24	2,0996	11,90	0,1059	1,9938	0,0194
0,9925	5,21	3,7989	64,47	0,5736	3,2254	0,0325
1,0144	5,19	5,6673	154,47	1,3743	4,2930	0,0423
1,0062	5,18	7,6868	362,47	3,2248	4,4620	0,0443
1,0223	5,16	8,8790	545,57	4,8538	4,0252	0,0394

**Tabla 55.** Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo s-MO + arsenito (duplicado).

Masa suelo seco [g]	pH	Conc. ofrecida [mmol/L]	Conc. equilibrio [mg / L]	Conc. Equilibrio [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmol/L]	Conc. adsorbida [mmolads/g]
1,0052	5,39	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
1,0060	5,41	0,0536	0,34	0,0030	0,0506	0,0005
1,0036	5,33	0,4297	0,42	0,0037	0,4260	0,0042
1,0040	5,27	0,8772	1,90	0,0169	0,8603	0,0086
0,9980	5,24	2,0996	9,13	0,0812	2,0184	0,0202
1,0002	5,21	3,7989	49,53	0,4407	3,3583	0,0336
1,0111	5,19	5,6673	118,63	1,0554	4,6118	0,0456
1,0147	5,18	7,6868	212,63	1,8917	5,7951	0,0571
0,9911	5,16	8,8790	418,63	3,7245	5,1545	0,0520

**Tabla 56.** Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo s-MO + molibdato (muestra).

<b>Masa suelo seco [g]</b>	<b>pH</b>	<b>Conc. ofrecida [mmol/L]</b>	<b>Conc. equilibrio [mg / L]</b>	<b>Conc. Equilibrio [mmol/L]</b>	<b>Conc. adsorbida [mmol/L]</b>	<b>Conc. adsorbida [mmolads/g]</b>
1,0042	5,41	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
1,0119	5,35	0,0536	0,02	0,0002	0,0535	0,0005
1,0077	5,29	0,4297	1,35	0,0120	0,4177	0,0041
1,0040	5,23	0,8772	4,63	0,0412	0,8360	0,0083
1,0025	5,20	2,0996	18,92	0,1683	1,9313	0,0193
1,0086	5,16	3,7989	69,52	0,6185	3,1804	0,0315
1,0000	5,13	5,6673	251,22	2,2351	3,4322	0,0343
1,0217	5,11	7,6868	457,22	4,0678	3,6190	0,0354
1,0163	5,10	8,8790	603,22	5,3667	3,5123	0,0346

**Tabla 57.** Datos Isoterma de adsorción de cadmio en Suelo s-MO + molibdato (duplicado).

<b>Masa suelo seco [g]</b>	<b>pH</b>	<b>Conc. ofrecida [mmol/L]</b>	<b>Conc. equilibrio [mg / L]</b>	<b>Conc. Equilibrio [mmol/L]</b>	<b>Conc. adsorbida [mmol/L]</b>	<b>Conc. adsorbida [mmolads/g]</b>
0,9990	5,41	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
1,0050	5,35	0,0536	0,01	0,0001	0,0535	0,0005
1,0007	5,29	0,4297	1,03	0,0092	0,4205	0,0042
1,0097	5,23	0,8772	3,55	0,0316	0,8456	0,0084
1,0132	5,20	2,0996	14,59	0,1298	1,9698	0,0194
1,0101	5,16	3,7989	53,39	0,4750	3,3239	0,0329
1,0068	5,13	5,6673	142,89	1,2713	4,3960	0,0437
0,9982	5,11	7,6868	249,89	2,2233	5,4636	0,0547
0,9930	5,10	8,8790	462,89	4,1183	4,7607	0,0479