

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Determinación de iones intercambiables de suelo
(P, K, Ca y Mg) en regiones cafetaleras de
Guatemala, a través de diferentes métodos analíticos

Trabajo de investigación presentado por Byron Rodrigo
Álvarez Monterroso para optar al grado académico de
Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala
2012

Determinación de iones intercambiables de suelo
(P, K, Ca y Mg) en regiones cafetaleras de
Guatemala, a través de diferentes métodos analíticos

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Química

Determinación de iones intercambiables de suelo
(P, K, Ca y Mg) en regiones cafetaleras de
Guatemala, a través de diferentes métodos analíticos

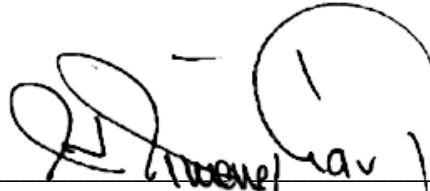
Investigación financiada por Asociación Nacional Del Café
Proyecto CEDICAFÉ

Trabajo de investigación presentado por Byron Rodrigo
Álvarez Monterroso para optar al grado académico de
Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala
2012

Vo.Bo.:

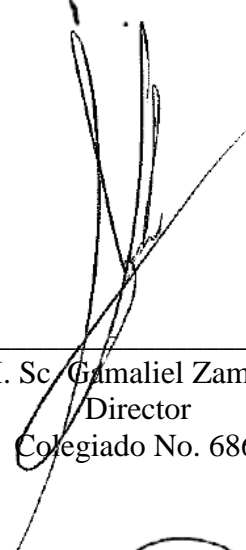
(f)



M. Sc. Humberto Jiménez
Colegiado No. 306

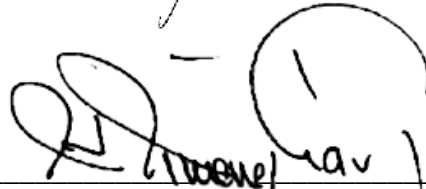
Tribunal:

(f)



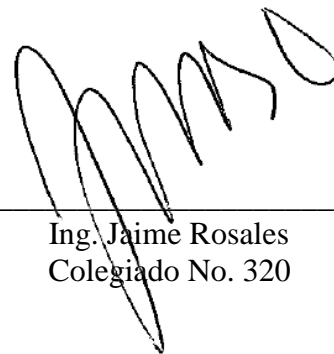
M. Sc. Gamaliel Zambrano
Director
Colegiado No. 686

(f)



M. Sc. Humberto Jiménez
Colegiado No. 306

(f)



Ing. Jaime Rosales
Colegiado No. 320

Fecha de aprobación: Guatemala, 30 de enero 2012

PREFACIO

La elaboración de esta tesis ha sido posible gracias a la concesión de trabajo en el Centro de Investigación del Café, otorgada por la Asociación Nacional del Café.

Quiero agradecer, en primer lugar, a la Dra. María Antonieta Alfaro, codirectora de este trabajo de investigación, su orientación y enseñanzas en el campo de la ciencia de suelos, sin el cual no pudiera haberse llevado a cabo. En segundo lugar, quiero mostrar mi más sincero agradecimiento al Ing. Humberto Jiménez, asesor de esta Tesis, por su dirección y compañía a lo largo del último año trabajando en el Centro de Investigación de Anacafé. En tercer lugar, es preciso agradecer al Lic. Tomás Prieto por sus cuestionamientos y dirección en la resolución de problemas y búsqueda de nuevas alternativas. En cuarto lugar, quiero agradecer a mis compañeros de departamento, por sus consejos y observaciones. También en el plano académico, doy las gracias al Ing. Gamaliel Zambrano, director de la carrera de Ingeniería Química, por su consentimiento en la presentación de esta investigación para mi trabajo de graduación.

En el plano personal, no puedo olvidarme de todas aquellas personas que me han acompañado hasta la conclusión de esta tesis. Primeramente agradezco a Dios por permitirme todas las oportunidades de estudio y trabajo, además de ayudarme a alcanzar todos mis logros hasta este momento. En segundo lugar agradezco a mis padres, Magaly y Byron; a mis hermanos, Andrés y José Enrique; a mi cuñada, Michelle, y a toda mi familia su incondicional apoyo, en todos los sentidos posibles. Y, finalmente, a mis amigos, un largo etcétera que me muestra, cada día, lo afortunado que soy: a Jesús, María, José María, Luis Carlos, Andrea, Luis Andrés, Regina, Gloria, Gabriela, Fernando, “Tito”, Mario y Laura, por estar a mi lado durante mis años de universidad; a mi grupo *Jóvenes Por Jesús y Tecolotes* por sacar lo mejor de mí mismo cada semana.

Espero que si alguien queda fuera de esta breve lista sepa excusarme.

A todos ellos reitero mi más sincero agradecimiento

CONTENIDO

Capítulo	Página No.
PREFACIO	V
CONTENIDO.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABLAS	XI
RESUMEN.....	XIV
ABSTRACT	XV
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN.....	2
III. OBJETIVOS	3
A. GENERAL.....	3
B. ESPECÍFICOS	3
IV. PROBLEMA A RESOLVER.....	4
V. MARCO TEÓRICO.....	5
A. MARCO TEÓRICO DE QUÍMICA	5
B. MARCO TEÓRICO DE QUÍMICA ANALÍTICA.....	16
C. MARCO TEÓRICO DE QUÍMICA DE SUELOS	21
D. MARCO TEÓRICO DE AGRONOMÍA	26
VI. METODOLOGÍA.....	31
A. SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO.....	31
B. MUESTREO.....	31
C. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO	31
D. DETERMINACIONES QUÍMICAS DE LAS MUESTRAS DE SUELO.....	32
E. DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS EVALUADOS	32
F. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	33
VII. RESULTADOS	34
A. FÓSFORO.....	34
B. POTASIO.....	39
C. CALCIO	41
D. MAGNESIO.....	43
VIII. DISCUSIÓN	46
IX. CONCLUSIONES	57
A. PARA EL FÓSFORO:.....	57
B. PARA EL POTASIO:	57
C. PARA EL CALCIO:	58
D. PARA EL MAGNESIO:	59
X. RECOMENDACIONES	60

XI. BIBLIOGRAFÍA	61
XII. APÉNDICE.....	63
A. PROCEDIMIENTO	63
B. DIAGRAMA DE FLUJO	64
C. EQUIPO UTILIZADO	66
D. REACTIVOS UTILIZADOS	67
E. INFORMACIÓN DE MUESTRAS ANALIZADAS.....	68
F. DATOS OBTENIDOS	75
G. CÁLCULO DE MUESTRA	105
H. ANÁLISIS DE ERROR	107
I. DATOS CALCULADOS	108
J. GRÁFICAS DE EXTRACCIÓN DE FÓSFORO.....	117
K. GRÁFICAS DE EXTRACCIÓN DE POTASIO.....	126
L. GRÁFICAS DE EXTRACCIÓN DE CALCIO	135
M. GRÁFICAS DE EXTRACCIÓN DE MAGNESIO	140
N. PRUEBAS DE LA ECUACIÓN DE FREUNDLICH	145
O. CURVAS DE EQUILIBRIO DE ADSORCIÓN.....	147

LISTA DE FIGURAS

Figura No.	Página No.
Figura 1. Separación por medio de un intercambiador catiónico	8
Figura 2. Separación por medio de un intercambiador aniónico	9
Figura 3. Deionización en dos etapas	9
Figura 4. Estructura química de la resina de estireno-divinilbenceno	12
Figura 5. Clorometilización (a) y la introducción de grupos de amonio cuaternarios (b) en resinas de estireno-divinilbenceno.	13
Figura 6. Diagrama de flujo con los pasos del análisis cuantitativo	16
Figura 7. Extracción promedio de fósforo por diferentes métodos	35
Figura 8. Mapa de niveles de fósforo en regiones cafetaleras determinadas a partir del método de intercambio iónico	37
Figura 9. Mapa de niveles de fósforo en regiones cafetaleras determinadas a partir del método de intercambio iónico, con acercamiento en Huehuetenango	38
Figura 10. Extracción promedio de potasio por diferentes métodos	40
Figura 11. Extracción promedio de calcio por diferentes métodos	41
Figura 12. Extracción promedio de magnesio por diferentes métodos.....	45
Figura 13. Diagrama de flujo de la extracción de suelo con mezclas de resinas intercambiadoras de iones.	64
Figura 14. Diagrama de flujo de la determinación de Ca Mg.....	65
Figura 15. Diagrama de flujo de la determinación de K.....	65
Figura 16. Diagrama de flujo de la determinación espectrofotométrica de P.....	65
Figura 17. Extracción de fósforo en suelos de Región I por diferentes métodos	117
Figura 18. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región I.....	117
Figura 19. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región I.....	117
Figura 20. Extracción de fósforo por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región I.....	118
Figura 21. Extracción de fósforo en suelos de Región II por diferentes métodos	118
Figura 22. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región II	118
Figura 23. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región II	119
Figura 24. Extracción de fósforo por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región II	119
Figura 25. Extracción de fósforo en suelos de Región III por diferentes métodos	119
Figura 26. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región III	120
Figura 27. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región III.....	120
Figura 28. Extracción de fósforo por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región III.....	120
Figura 29. Extracción de fósforo en suelos de Región IV por diferentes métodos.....	121
Figura 30. Extracción de fósforo intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región IV	121
Figura 31. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región IV	121
Figura 32. Extracción de fósforo por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región IV	122
Figura 33. Extracción de fósforo en suelos de Región V por diferentes métodos	122
Figura 34. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región V	122
Figura 35. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región V	123
Figura 36. Extracción de fósforo por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región V	123
Figura 37. Extracción de fósforo en suelos de Región VI por diferentes métodos.....	123
Figura 38. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región VI.....	124
Figura 39. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región VI.....	124
Figura 40. Extracción de fósforo por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región VI.....	124

Figura 41. Extracción de fósforo en suelos de Región VII por diferentes métodos	125
Figura 42. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región VII	125
Figura 43. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región VII	125
Figura 44. Extracción de fósforo por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región VII	126
Figura 45. Extracción de potasio en suelos de Región I por diferentes métodos	126
Figura 46. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región I.....	126
Figura 47. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región I	127
Figura 48. Extracción de potasio por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región I	127
Figura 49. Extracción de potasio en suelos de Región II por diferentes métodos	127
Figura 50. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región II	128
Figura 51. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región II	128
Figura 52. Extracción de potasio por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región II	128
Figura 53. Extracción de potasio en suelos de Región III por diferentes métodos	129
Figura 54. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región III	129
Figura 55. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región III.....	129
Figura 56. Extracción de potasio por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región III.....	130
Figura 57. Extracción de potasio en suelos de Región IV por diferentes métodos.....	130
Figura 58. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región IV.....	130
Figura 59. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región IV.....	131
Figura 60. Extracción de potasio por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región IV.....	131
Figura 61. Extracción de potasio en suelos de Región V por diferentes métodos	131
Figura 62. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región V	132
Figura 63. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región V	132
Figura 64. Extracción de potasio por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región V	132
Figura 65. Extracción de potasio en suelos de Región VI por diferentes métodos.....	133
Figura 66. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región VI.....	133
Figura 67. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región VI.....	133
Figura 68. Extracción de potasio por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región VI.....	134
Figura 69. Extracción de potasio en suelos de Región VII por diferentes métodos	134
Figura 70. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región VII	134
Figura 71. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región VII	135
Figura 72. Extracción de potasio por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región VII	135
Figura 73. Extracción de calcio en suelos de Región I por diferentes métodos	135
Figura 74. Extracción de calcio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región I	136
Figura 75. Extracción de calcio en suelos de Región II por diferentes métodos	136
Figura 76. Extracción de calcio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región II	136
Figura 77. Extracción de calcio en suelos de Región III por diferentes métodos	137
Figura 78. Extracción de calcio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región III.....	137
Figura 79. Extracción de calcio en suelos de Región IV por diferentes métodos.....	137
Figura 80. Extracción de calcio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región IV.....	138
Figura 81. Extracción de calcio en suelos de Región V por diferentes métodos	138
Figura 82. Extracción de calcio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región V	138
Figura 83. Extracción de calcio en suelos de Región VI por diferentes métodos.....	139
Figura 84. Extracción de calcio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región VI.....	139
Figura 85. Extracción de calcio en suelos de Región VII por diferentes métodos	139
Figura 86. Extracción de calcio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región VII	140
Figura 87. Extracción de magnesio en suelos de Región I por diferentes métodos.....	140
Figura 88. Extracción de magnesio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región I.....	140
Figura 89. Extracción de magnesio en suelos de Región II por diferentes métodos	141
Figura 90. Extracción de magnesio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región II	141

Figura 91. Extracción de magnesio en suelos de Región III por diferentes métodos	141
Figura 92. Extracción de magnesio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región III	142
Figura 93. Extracción de magnesio en suelos de Región IV por diferentes métodos	142
Figura 94. Extracción de magnesio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región IV	142
Figura 95. Extracción de magnesio en suelos de Región V por diferentes métodos	143
Figura 96. Extracción de magnesio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región V	143
Figura 97. Extracción de magnesio en suelos de Región VI por diferentes métodos	143
Figura 98. Extracción de magnesio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región VI.....	144
Figura 99. Extracción de magnesio en suelos de Región VII por diferentes métodos.....	144
Figura 100. Extracción de magnesio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región VII.....	144
Figura 101. Log q_e versus Log C_e según Ley de Freundlich para curva de adsorción de fósforo	145
Figura 102. Log q_e versus Log C_e según Ley de Freundlich para curva de adsorción de potasio	145
Figura 103. Log q_e versus Log C_e según Ley de Freundlich para curva de adsorción de calcio	146
Figura 104. Log q_e versus Log C_e según Ley de Freundlich para curva de adsorción de magnesio	146
Figura 105. Curva de equilibrio de la adsorción de P sobre las resinas intercambiadoras de iones.	147
Figura 106. Curva de equilibrio de la adsorción de K sobre las resinas intercambiadoras de iones.	147
Figura 107. Curva de equilibrio de la adsorción de Ca sobre las resinas intercambiadoras de iones.	148
Figura 108. Curva de equilibrio de la adsorción de Mg sobre las resinas intercambiadoras de iones.	148

LISTA DE TABLAS

Tabla No.	Página No.
Tabla 1. Concentraciones típicas de elementos ($\mu\text{g/g}$ suelo) en suelos de varias regiones geográficas.....	24
Tabla 2. Componentes inorgánicos mayores encontrados en soluciones de suelo	25
Tabla 3. Efectividad de métodos de extracción de P del suelo para predecir la absorción de P por la planta	29
Tabla 4. Descripción de las regiones y número de muestras correspondiente.....	31
Tabla 5. Características químicas determinadas y metodologías utilizadas para el análisis	32
Tabla 6. Descripción de metodologías utilizadas para análisis de muestras.....	32
Tabla 7. Descripción de metodologías utilizadas para análisis de muestras	33
Tabla 8. Resultados de la determinación de fósforo para cada región analizada según los tres métodos evaluados.....	34
Tabla 9. Resumen de la extracción de fósforo para todas las muestras según los tres métodos evaluados	35
Tabla 10. Ecuaciones lineales de regresión para análisis de fósforo (P) por diferentes métodos analíticos	35
Tabla 11. Coeficientes de correlación lineal entre diferentes metodologías para el análisis de fósforo (P)	36
Tabla 12. Resultados de la determinación de potasio para cada región analizada según los tres métodos evaluados.....	39
Tabla 13. Resumen de la extracción de potasio para todas las muestras según los tres métodos evaluados	40
Tabla 14. Ecuaciones lineales de regresión para análisis de potasio (K) por diferentes métodos analíticos	40
Tabla 15. Coeficientes de correlación lineal entre diferentes metodologías para el análisis de potasio (K).....	41
Tabla 16. Resultados de la determinación de calcio para cada región analizada según los dos métodos evaluados.....	42
Tabla 17. Resumen de la extracción de calcio para todas las muestras según los dos métodos evaluados.....	41
Tabla 18. Ecuaciones lineales de regresión para análisis de calcio (Ca) por diferentes métodos analíticos.....	43
Tabla 19. Coeficientes de correlación lineal entre diferentes metodologías para el análisis de calcio (Ca)	43
Tabla 20. Resultados de la determinación de magnesio para cada región analizada según los dos métodos evaluados.....	44
Tabla 21. Resumen de la extracción de magnesio para todas las muestras según los dos métodos evaluados.....	44
Tabla 22. Ecuaciones lineales de regresión para análisis de magnesio (Mg) por diferentes métodos analíticos	45
Tabla 23. Coeficientes de correlación lineal entre diferentes metodologías para el análisis de calcio (Mg)	45
Tabla 24. Información de suelos de Región I.....	68
Tabla 25. Información de suelos de Región II.....	69
Tabla 26. Información de suelos de Región III	70
Tabla 27. Información de suelos de Región IV	71
Tabla 28. Información de suelos de Región V	72
Tabla 29. Información de suelos de Región VI.....	73
Tabla 30. Información de suelos de Región VII.....	74
Tabla 31. Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región I.....	75
Tabla 32. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región I.....	76
Tabla 33. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región I.....	77

Tabla 34. Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región II.....	78
Tabla 35. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región II	79
Tabla 36. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región II	80
Tabla 37. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región II	81
Tabla 38. Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región III	82
Tabla 39. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región III	83
Tabla 40. Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región IV	84
Tabla 41. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región IV	85
Tabla 42. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región IV	86
Tabla 43. Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región V	87
Tabla 44. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región V	88
Tabla 45. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región V	89
Tabla 46. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región V	90
Tabla 47. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región V	91
Tabla 48. Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región VI.....	92
Tabla 49. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región VI.....	93
Tabla 50. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región VI.....	94
Tabla 51. Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región VII.....	95
Tabla 52. Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región VII.....	96
Tabla 53. Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región VII.....	97
Tabla 54. Extracción de analitos por métodos de Olsen, KCl y Mehlich I para muestras de Región I	98
Tabla 55. Extracción de analitos por métodos de Olsen, KCl y Mehlich I para muestras de Región II	99
Tabla 56. Extracción de analitos por métodos de Olsen, KCl y Mehlich I para muestras de Región III	100
Tabla 57. Extracción de analitos por métodos de Olsen, KCl y Mehlich I para muestras de Región IV	100
Tabla 58. Extracción de analitos por métodos de Olsen, KCl y Mehlich I para muestras de Región V	101

Tabla 59. Extracción de analitos por métodos de Olsen, KCl y Mehlich I para muestras de Región VI.....	102
Tabla 60. Extracción de analitos por métodos de Olsen, KCl y Mehlich I para muestras de Región VII	103
Tabla 61. Concentraciones iniciales utilizadas para elaborar las curvas de equilibrio y concentraciones finales obtenidas tras una extracción por resinas de intercambio iónico.	104
Tabla 62. Promedio de lecturas, desviación estándar y coeficiente de variación en Región I.....	108
Tabla 63. Promedio de lecturas, desviación estándar y coeficiente de variación en Región II.....	109
Tabla 64. Promedio de lecturas, desviación estándar y coeficiente de variación en Región III	110
Tabla 65. Promedio de lecturas, desviación estándar y coeficiente de variación en Región IV	111
Tabla 66. Promedio de lecturas, desviación estándar y coeficiente de variación en Región V	112
Tabla 67. Promedio de lecturas, desviación estándar y coeficiente de variación en Región VI.....	113
Tabla 68. Promedio de lecturas, desviación estándar y coeficiente de variación en Región VII.....	114
Tabla 69. Adsorción aparente del fósforo sobre las resinas de intercambio y su concentración final de equilibrio en solución para cada punto de evaluación.	115
Tabla 70. Adsorción aparente del potasio sobre las resinas de intercambio y su concentración final de equilibrio en solución para cada punto de evaluación.	115
Tabla 71. Adsorción aparente del calcio sobre las resinas de intercambio y su concentración final de equilibrio en solución para cada punto de evaluación.	116
Tabla 72. Adsorción aparente del magnesio sobre las resinas de intercambio y su concentración final de equilibrio en solución para cada punto de evaluación.	116

RESUMEN

El objetivo principal de este estudio fue contribuir al desarrollo y adecuación de la metodología de extracción de iones de suelo (P, K, Ca y Mg) por resinas de intercambio iónico para el diagnóstico de la fertilidad en suelos cafetaleros en Guatemala. Para esto se determinó las diferencias en la extracción de los iones intercambiables utilizando las metodologías: Olsen modificado y Mehlich I para análisis de P y K; el método de KCl 1M para el análisis de Ca y Mg; y el método de extracción por resinas de intercambio iónico para todos los iones P, K, Ca y Mg. Se analizó un total de 150 representativas de las regiones cafetaleras más importantes del país a través de los diferentes métodos. El comportamiento promedio de los nutrientes se estableció para cada región según la metodologías evaluada. Con los resultados de fósforo obtenidos por el método de intercambio iónico se elaboró un mapa de comportamiento entre las diferentes regiones cafetaleras, diferenciando niveles altos, medios y bajos del nutriente.

Por el método de intercambio iónico, se determinó que las regiones cafetaleras tienen un promedio de fósforo (en orden de mayor a menor) como sigue: Región V (91.54 ppm), Región IV (53.85 ppm), Región III (53.54 ppm), Región II (33.03 ppm), Región I (32.32 ppm), Región VII (26.33 ppm) y Región VI (12.17 ppm). El método de intercambio iónico extrajo en promedio 44.63% más de fósforo que el método de Olsen Modificado y 25.13% más de fósforo en comparación con Mehlich I para todas las regiones. Para el potasio, se determinó que las regiones cafetaleras tienen un promedio (en orden de mayor a menor) como sigue: Región V (6.7 mmol c/L), Región III (5.14 mmol c/L), Región IV (5.08 mmol c/L), Región II (4.37 mmol c/L), Región VII (3.76 mmol c/L), Región I (3.16 mmol c/L) y Región VI (2.02 mmol c/L). El método de intercambio iónico extrajo en promedio 11.52% más de potasio que el método de Olsen Modificado y 34.84% más que el método de Mehlich I para todas las regiones.

También por el método de intercambio iónico, se determinó que las regiones cafetaleras tienen un promedio de calcio (en orden de mayor a menor) como sigue: Región IV (67.73 mmol c/L), Región V (64.44 mmol c/L), Región III (42.45 mmol c/L), Región VII (34.13 mmol c/L), Región II (22.89 mmol c/L), Región VI (22.59 mmol c/L) y Región I (14.02 mmol c/L). El método de KCl 1M extrajo en promedio 22.07% más de calcio que el método de Intercambio Iónico. Para el magnesio, se determinó que las regiones cafetaleras tienen un promedio (en orden de mayor a menor) como sigue: Región V (18.94 mmol c/L), Región IV (17.57 mmol c/L), Región III (11.78 mmol c/L), Región VI (9.03 mmol c/L), Región VII (8.08 mmol c/L), Región II (5.86 mmol c/L) y Región I (4.54 mmol c/L). El método de KCl 1M extrajo en promedio 26.37% más de magnesio que el método de intercambio iónico para todas las regiones.

ABSTRACT

The main objective of this study was to contribute to the development and adjustment of the ion extraction method for soil exchangeable ions (P, K, Ca and Mg) using ion exchange resins for the diagnosis of coffee soil fertility in Guatemala. To accomplish this objective, differences between extraction capacities were established among the following methods: Mehlich I method and Modified Olsen method for Phosphorous and Potassium analysis; Potassium Chloride method (KCl 1M) for Calcium and Magnesium analysis; and finally the ion exchange method analysis for all soil exchangeable ions (P, K, Ca and Mg). A total of 150 samples were analyzed through all previous methods. These samples were carefully chosen to be representative for the total coffee-growing regions in the country. The average behaviors for P, K, Ca and Mg were established among all regions according to the method used. With the phosphorus results obtained using the ion exchange method, a behavior map was plotted including all growing regions and distinguishing high, medium and low nutrient levels.

With the ion exchange method, the coffee regions have average phosphorus concentrations (from highest to lowest) as follows: Region V (91.54 ppm), Region IV (53.85 ppm), Region III (53.54 ppm), Region II (33.03 ppm), Region I (32.32 ppm), Region VII (26.33 ppm) and Region VI (12.17 ppm). In average, the ion exchange method extracted 44.63% more phosphorus than Modified Olsen method and 25.13% more phosphorus compared to Mehlich I method. Also, the coffee regions have average potassium concentrations (from highest to lowest) as follows: Region V (6.7 mmol c / L), Region III (5.14 mmol c / L), Region IV (5.08 mmol c / L), Region II (4.37 mmol c / L), Region VII (3.76 mmol c / L), Region I (3.16 mmol c / L) and Region VI (2.02 mmol c / L). In average, the ion exchange method extracted 11.52% more potassium than Modified Olsen method and 34.84% more potassium compared to Mehlich I Method.

Moreover, with the ion exchange method, the coffee regions have average calcium concentrations (from highest to lowest) as follows: Region IV (67.73 mmol c / L), Region V (64.44 mmol c / L), Region III (42.45 mmol c / L), Region VII (34.13 mmol c / L), Region II (22.89 mmol c / L), Region VI (22.59 mmol c / L) and Region I (14.02 mmol c / L). In average, KCl 1M method drew 22.07% more calcium than the ion exchange method. For magnesium, it was determined that the coffee regions have average concentrations (from highest to lowest) as follows: Region V (18.94 mmol c / L), Region IV (17.57 mmol c / L), Region III (11.78 mmol c / L), Region VI (3.9 mmol c / L), Region VII (8.08 mmol c / L), Region II (5.86 mmol c / L) and Region I (4.54 mmol c / L). In average, KCl 1M method drew 26.37% more magnesium than the ion exchange method for all regions.

I. INTRODUCCIÓN

Los métodos químicos para analizar la disponibilidad de nutrientes para los cultivos agrícolas han sufrido cambios con el tiempo. El objetivo de estas modificaciones es conseguir implementar una solución extractora que posea un poder similar de extracción que las raíces de una planta sana. A la vez, se debe determinar las proporciones adecuadas suelo-solución extractora, tiempos de extracción, etc., para conseguir resultados más confiables y estandarizar la metodología correspondiente.

En Guatemala, son tradicionales los métodos de extracción de Mehlich 1 y Olsen modificado para fósforo y potasio, mientras que calcio y magnesio son analizados mediante extracción con KCl 1M, quedando en evidencia que estos métodos no permiten describir globalmente las relaciones suelo-planta, ni permiten cuantificar la reserva total de los nutrientes. El uso de resinas de intercambio iónico ha abierto nuevas posibilidades para describir la disponibilidad de los iones P, K, Ca y Mg y las relaciones suelo-planta en forma más adecuada. En la última década, este método de análisis se ha introducido y utilizado exitosamente en suelos de Europa, Norteamérica, Sudáfrica, Nueva Zelanda, Brasil y Costa Rica. Se ha observado también que este método es apropiado tanto para suelos ácidos como para alcalinos.

El objetivo principal de este estudio será contribuir al desarrollo y adecuación de la metodología de resinas de intercambio, para la extracción de iones intercambiables de suelo (P, K, Ca y Mg). Esto contribuirá al adecuado diagnóstico de la fertilidad de los tipos de suelo más importantes de en el área cafetalera de Guatemala.

Para cumplir este objetivo se seleccionaron suelos representativos de las regiones productoras de café (cuya información completa de localización se encuentra en el capítulo de Anexos), procediéndose a hacer la extracción de iones mediante las técnicas de Mehlich 1, Olsen modificado y KCl 1M, comparando con la metodología de resinas de intercambio. Estos resultados de comparación se muestran en el capítulo de Resultados.

La comparación de los valores obtenidos por los cuatro métodos y su relación con el rendimiento de los cultivos permitiría comprobar si la técnica propuesta es más adecuada que las tradicionalmente usadas para la predicción de la fertilidad del suelo en Guatemala. Este estudio se limita a determinar las diferencias de extracción entre las diferentes metodologías de los elementos fósforo, potasio, calcio y magnesio. No se analiza aquí la relación con el rendimiento de las plantas, por lo que se recomendó complementar el estudio con un análisis adicional. De obtenerse resultados satisfactorios, la metodología por resinas de intercambio sería recomendada para el análisis de rutina en el Laboratorio de Análisis de Suelos de Anacafé (ANALAB), lo cual sería de beneficio para el sector cafetalero de Guatemala y otros sectores agrícolas que requieran de este servicio.

En esta investigación, se aplicó teoría de transferencia de masa, adsorción, intercambio iónico y extracción sólido-líquido, resumida en el capítulo de Marco Teórico. Se aplicó también buenas prácticas de laboratorio, para conseguir resultados confiables. El estudio se realizó en el Laboratorio de Suelos y Plantas de Anacafé (ANALAB), durante el periodo comprendido de junio a diciembre de 2011.

II. JUSTIFICACIÓN

Entre las metodologías tradicionales en Guatemala para la determinación de P y K de suelo, predominan las basadas en soluciones extractoras de ácidos fuertes diluidos a baja concentración. Tal es así que las metodologías de Mehlich 1 y 3 han sido ampliamente correlacionadas con el rendimiento de planta. Sin embargo, no en todos los suelos se observa una correlación satisfactoria. Según Raij y Quaggio (2009), para suelos ácidos el coeficiente de correlación r^2 es 0.56 y para suelos alcalinos es apenas $r^2 = 0.39$. En tal virtud, se inició la implementación del método de Olsen modificado para adecuarlo al diagnóstico de la fertilidad en los suelos cafetaleros (ANACAFÉ). Según Raij y Quaggio (2009), el método de Olsen tampoco satisface una correlación adecuada para predecir la absorción de fósforo por la planta porque correlaciona $r^2 = 0.47$ para suelos ácidos y $r^2 = 0.52$ para suelos alcalinos. Se presenta la alternativa de utilización del método de resinas de intercambio iónico, las cuales permiten la extracción eficiente y más correlacionada con la actividad radicular de las plantas de café. Según Raij y Quaggio (2009), para suelos ácidos el coeficiente de correlación r^2 es 0.84 y para suelos alcalinos y neutros es $r^2 = 0.83$, siendo éste un método más estable para los diferentes rangos de acidez.

Un cambio en las metodologías tradicionales implica pruebas preliminares, adquisición de nuevo equipo, entrenamiento de personal y la respectiva calibración metodológica. Todo lo cual justifica la realización de esta investigación en la cual se llevará a cabo la comparación entre las metodologías Mehlich I, Olsen Modificado y Resinas de intercambio, para los elementos P y K, mientras que para los cationes Ca y Mg serán comparada la metodología de extracción con KCl y la determinación a través del método de resinas de intercambio.

En vista de las facilidades ofrecidas por el Laboratorio de Análisis de Suelos y Plantas de ANACAFÉ (ANALAB), se presentó la posibilidad de realizar este trabajo, el cual será de beneficio para el sector cafetalero del país, así como de otros sectores de la agricultura que requieran los servicios de este laboratorio.

III. OBJETIVOS

A. General

Contribuir al desarrollo y adecuación de la metodología de extracción de iones de suelo (P, K, Ca y Mg) por resinas de intercambio iónico para el diagnóstico de la fertilidad en suelos cafetaleros en Guatemala.

B. Específicos

1. Determinar las diferencias en la extracción de iones intercambiables (P, K, Ca y Mg) de suelo utilizando las distintas metodologías.
2. Establecer el comportamiento de los suelos en las siete regiones cafetaleras más relevantes en la caficultura, ante las metodologías evaluadas.
3. Establecer diferencias en la extracción de los iones del suelo entre las metodologías Olsen modificado y Mehlich I para P y K; y KCl 1M para Ca y Mg y la extracción por resinas de intercambio iónico.
4. Elaborar un mapa del comportamiento del fósforo a nivel de regiones cafetaleras, mostrando niveles altos, medios y bajos de este elemento obtenidos con la metodología de resinas de intercambio iónico.

IV. PROBLEMA A RESOLVER

En Guatemala existe una gran diversidad fisiográfica, climática y geológica que al interactuar con el tiempo han fomentado la formación de diferentes tipos de suelos en todo el país. Cada tipo con diferentes propiedades físicas y químicas, lo que causa que los nutrientes como fósforo, potasio, calcio y magnesio se encuentren distribuidos de forma no uniforme bajo distintas formas químicas. El análisis de la fertilidad de todos los suelos del país, a través de una sola solución extractora generalmente es muy complicado debido a las mismas diferencias en las propiedades de los suelos, que los hacen reaccionar de diferente manera ante el método empleado.

Según la bibliografía revisada, en laboratorios de análisis de suelos en otros países centroamericanos, se solía utilizar tradicionalmente el método de Mehlich I para analizar el fósforo, potasio, calcio y magnesio en todos los suelos, sin tomar en cuenta las diferencias por diversidad climática, geológica o fisiográfica de la región. Se demostró después que este método no es apropiado para suelos con pH alcalino porque extrae fósforo no disponible para la planta. Esto provocó una interpretación errónea de resultados y, a la vez, una recomendación no apropiada de programas de fertilización, afectando los rendimientos de cultivos y pérdidas económicas para el sector cafetalero, especialmente en Costa Rica.

Ante esta situación, el Laboratorio de ANACAFÉ implementó en Guatemala el método de Olsen Modificado para el análisis de los elementos que presentó resultados más favorables. Sin embargo, este método se demostró después no ser muy efectivo para suelos con pH ácido. En Guatemala, la acidez del suelo es muy variada, aunque con cierta tendencia a la acidez en los suelos cafetaleros, lo que exige un método capaz de analizar el fósforo sin limitaciones de pH. En varios países desarrollados, se ha observado que el método de análisis por intercambio iónico es independiente de estas condiciones y su extracción no está limitada por diferentes niveles de pH. Se pretende entonces evaluar los diferentes métodos en la extracción de fósforo, potasio, calcio y magnesio para determinar sus diferencias analizando puntos representativos de las regiones más importantes en la caficultura del país. De esta forma, se puede determinar cuál método es más efectivo para la extracción de estos nutrientes para cada región y encontrar posibles correlaciones entre los métodos.

V. MARCO TEÓRICO

A. Marco teórico de Química

1. Definiciones

a. **Adsorción:** Capacidad especial de ciertos sólidos para hacer que sustancias específicas de una solución se concentren en la superficie de la misma. De esta forma, pueden separarse unos de otros los componentes de soluciones gaseosas o líquidas. En el campo de las separaciones gaseosas, la adsorción se utiliza para deshumidificar aire y otros gases, para eliminar olores e impurezas desagradables de gases industriales como dióxido de carbono, para recuperar vapores valiosos de disolvente a partir de mezclas diluidas con aire y otros gases y para fraccionar mezclas de gases de hidrocarburos que contienen sustancias como metano, etileno, etano, propileno y propano. Las separaciones típicas de líquidos incluyen la eliminación de humedad disuelta en gasolina, decoloración de productos de petróleo y soluciones acuosas de azúcar, eliminación de sabor y olor desagradables del agua y el fraccionamiento de mezclas de hidrocarburos aromáticos y parafínicos. (Treybal, 1988)

b. **Adsorbentes polímeros sintéticos:** Son perlas esféricas porosas, 0.5 mm de diámetro; cada perla es un conjunto de microesferas, 10-4 mm de diámetro. El material es sintético, fabricado de monómeros polimerizables de dos tipos principales. Los fabricados a partir de aromáticos insaturados como estireno y divinilbenceno, son útiles para la adsorción de orgánicos no polares a partir de soluciones acuosas. Los fabricados a partir de esterres acrílicos son adecuados para solutos más polares. Se utilizan principalmente en el tratamiento de soluciones acuosas; se regeneran por lixiviación con alcoholes o cetonas de bajo peso molecular. (Treybal, 1988)

c. **Capacidad de intercambio iónico:** ésta indica el número de grupos ionógenos fijados en miliequivalentes por gramo de resina seca en la forma de H⁺ (para intercambiadores catiónicos) y en la forma de Cl⁻ (para intercambiadores aniónicos). Para las resinas débilmente ácidas o débilmente básicas, los grupos ionógenos involucran tanto a los grupos intercambiadores ionizados como los no ionizados. (Samuelson, 1963)

d. **Eluyente:** Solución electrolítica que se aplica por medio de una elución en exceso para remover los iones retenidos en el intercambiador iónico. Para fines prácticos la elución se realiza con una solución que contiene un ión intercambiable y la resina se transforma directamente a su estado que se utiliza para la adsorción, i.e., la resina se regenera. (Samuelson, 1963)

e. **Disoluciones iónicas:** Las disoluciones iónicas se comportan como conductores eléctricos bajo un campo eléctrico debido a que conducen cargas gracias al transporte de éstas por la presencia de los iones en el medio, i.e., al medio iónico. Los medios iónicos pueden estar formados por:

1) **Electrolitos verdaderos o ionóforos:** Son sustancias que en estado puro están formadas por iones unidos por fuerzas electrostáticas, en una red cristalina bien definida. Estas sustancias no necesitan interactuar con otras para estar en forma ionizada. Tal es el caso de los haluros de metales alcalinos. (Baeza; García, 2011)

2) **Electrolitos potenciales o ionógenos:** Son sustancias que en estado puro no están ionizadas, o bien presentan una ionización despreciable. Estas sustancias por sí solas, no producen un medio iónico, por lo que necesitan interactuar con un ionóforo, o bien con otro ionógeno para generar un medio iónico adecuado. (Baeza; García, 2011)

f. **Intercambio iónico:** Operación sólido-líquido que involucra un intercambio reversible de iones entre ciertos sólidos y una solución de electrolitos, que permite la separación y fraccionamiento de solutos electrolíticos. Es una adsorción de naturaleza química, que abarca no sólo la interacción de los iones con el sólido sino también la difusión de los iones dentro de la fase sólida. Aunque el fenómeno puede ser más complejo que la adsorción, las técnicas generales y los resultados obtenidos son muy similares. (Treybal, 1988)

g. **Intercambiador iónico:** los intercambiadores típicos de iones son resinas de intercambio iónico (porosas funcionales o polímeros en gel), zeolitas, montmorillonita, arcilla y humus de suelo. Los intercambiadores iónicos pueden ser intercambiadores catiónicos que intercambian iones con cargas positivas (cationes), o intercambiadores aniónicos que intercambian iones con cargas negativas (aniones). También existen intercambiadores anfóteros que son capaces de intercambiar ambos cationes y aniones simultáneamente. Sin embargo, este intercambio simultáneo puede ser realizado más eficientemente en lechos mixtos que contienen una mezcla de resinas aniónicas y catiónicas. (Samuelson, 1963)

2. **Adsorción.** Las operaciones de adsorción explotan la capacidad especial de ciertos sólidos para hacer que sustancias específicas de una solución se concentren en la superficie de la misma. De esta forma, pueden separarse unos de otros los componentes de soluciones gaseosas o líquidas. Unos cuantos ejemplos indicarán la naturaleza general posible de las separaciones y al mismo tiempo la gran variedad de aplicaciones prácticas. La escala de operación va desde el uso de unos cuantos gramos de adsorbente en el laboratorio hasta las plantas industriales, cuyo inventario de adsorbente excede los 135,000 kg. (Treybal, 1988)

Todas estas operaciones son similares en que la mezcla por separar se pone en contacto con otra fase insoluble, el sólido adsorbente, y en que la distinta distribución de los componentes originales entre la fase adsorbida en la superficie sólida y el fluido permite que se lleve a cabo una separación. Todas las técnicas que previamente se consideraron valiosas para el contacto entre fluidos insolubles, también son útiles en la adsorción. Por tanto, se tienen separaciones por lotes en una sola etapa, separaciones continuas en varias

etapas y separaciones análogas a la absorción y desorción a contracorriente en el campo del contacto gas-líquido y a la rectificación y extracción mediante reflujo. (Treybal, 1988)

Una operación sólido-líquido de gran importancia es el intercambio iónico, el intercambio reversible de iones entre ciertos sólidos y una solución de electrolitos, que permite la separación y fraccionamiento de solutos electrolíticos. Por supuesto, su naturaleza es química, pero abarca no sólo la interacción de los iones con el sólido sino también la difusión de los iones dentro de la fase sólida. Aunque el fenómeno puede ser más complejo que la adsorción, las técnicas generales y los resultados obtenidos son muy similares. (Treybal, 1988)

a. Adsorción del soluto a partir de soluciones diluidas: Cuando un adsorbente se mezcla con una solución binaria, ocurre tanto la adsorción del soluto como del disolvente. Puesto que la adsorción total no se puede medir, se determina, en lugar de esta, la adsorción relativa o aparente. El procedimiento acostumbrado es tratar un volumen conocido de solución con un peso conocido de adsorbente, v volumen solución/masa adsorbente. Como resultado de la adsorción preferente de soluto, se observa que la concentración de soluto del líquido cae del valor inicial c al valor final en el equilibrio c^* (masa soluto/volumen líquido). La adsorción aparente de soluto, despreciando cualquier cambio de volumen en la solución, es $v(c_0 - c^*)$ masa soluto adsorbido/masa adsorbente. Esto es satisfactorio para soluciones diluidas, cuando es pequeña la fracción del disolvente original que puede adsorberse. (Treybal, 1988)

Algunas veces se corrige el volumen del soluto que aparentemente se adsorbió. Así el contenido inicial de disolvente de esta solución es $v(1 - c_0/e)$; suponiendo que no se adsorbe disolvente, el volumen de la solución residual es $v(1 - c_0/e)/(1 - c^*/e)$. Entonces, la adsorción aparente de soluto es la diferencia entre el contenido inicial y final de soluto en el líquido, $vc_0 - v(1 - c_0/e)/(1 - c^*/e)$ o $v(c_0 - c^*)/(1 - c^*/e)$. Por supuesto, se sigue despreciando la adsorción de disolvente. (Treybal, 1988)

La adsorción aparente de un soluto dado depende de la concentración del soluto, la temperatura, el disolvente y el tipo de adsorbente. El grado de adsorción de un soluto determinado prácticamente decrece siempre que aumenta la temperatura; generalmente es mayor cuanto menor es la solubilidad en el disolvente. Como de ordinario es reversible, se obtiene la misma isoterma, ya sea que el soluto se desorba o se adsorba. (Treybal, 1988)

b. La ecuación de Freundlich: Es un rango pequeño de concentración, y en particular sobre soluciones diluidas, las isotermas de adsorción pueden describirse a menudo mediante una expresión empírica, que generalmente se le atribuye a Freundlich,

$$c^* = k[v(c_0 - c^*)]^n$$

Ecuación 1

En donde $v(c_0 - c^*)$ es la adsorción aparente por masa unitaria de adsorbente; k y n son constantes. Con frecuencia, se utilizan también otras unidades de concentración; aunque estas unidades inducirán valores diferentes de k , con respecto a las soluciones diluidas para las cuales se pueden aplicar la ecuación, el valor de n permanecerá invariable. La forma de la ecuación indica que si la concentración de soluto en el

equilibrio como ordenada se grafica contra el contenido de adsorbato del sólido como abscisa, sobre las coordenadas logarítmicas, se obtendrá una línea recta de pendiente n e intersección k . (Treybal, 1988)

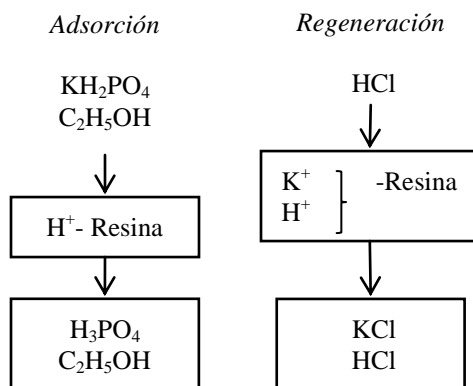
3. **Generalidades del intercambio iónico.** El intercambio iónico es un intercambio de iones entre dos electrolitos o entre una solución electrolítica y un complejo. En la mayoría de casos, el término se usa para denotar el proceso de purificación, separación o descontaminación de soluciones acuosas que contienen iones con intercambiadores de iones sólidos poliméricos o minerales. (Samuelson, 1963)

Las operaciones de intercambio iónico son básicamente reacciones químicas de sustitución entre un electrolito en solución y un electrolito insoluble con el cual se pone en contacto la solución. El mecanismo de estas reacciones y las técnicas utilizadas para lograrlas son tan parecidos a los de adsorción que, para la mayoría de los fines de Ingeniería, el intercambio iónico puede considerarse simplemente como un caso especial de la adsorción. (Treybal, 1988)

Muy comúnmente, en el análisis cualitativo y cuantitativo, aparecen dificultades porque ciertos aniones tienen un efecto interferente en la determinación de ciertos cationes, y viceversa. De forma similar, muchas determinaciones de no electrolitos son complicadas por la presencia de electrolitos, y la determinación de ciertos iones es complicada por la presencia de no electrolitos. Estas complicaciones pueden ser eliminadas por un simple procedimiento de intercambio iónico, la cual hace la división de una solución en dos o tres (o a veces más) posibles fracciones. (Samuelson, 1963)

El principio principal del método de intercambio iónico es el intercambio, con la ayuda de un intercambiador iónico, de todos los iones intercambiables de la misma carga (positiva o negativa) por otros iones de la misma carga. En la elución del intercambiador iónico una solución es obtenida conteniendo los iones removidos de la solución original junto con el exceso de eluyente. Una división entonces ha tomado lugar en dos diferentes fracciones que contienen (a) no electrolitos, iones no intercambiables e iones del tipo que existen originalmente en el intercambiador iónico; (b) iones retenidos e iones existentes en el eluyente. (Samuelson, 1963)

Figura 1. Separación por medio de un intercambiador catiónico



Las separaciones se pueden realizar con la ayuda de un intercambiador catiónico o uno aniónico. El principio se muestra en la Figura 1 y 2, donde una solución acuosa de fosfato de potasio y etilalcohol son utilizados como ejemplo. Usando un intercambiador catiónico y uno aniónico, se obtiene una división en tres fracciones, e.g., el esquema mostrado en la Figura 3. Puede ser conveniente designar, para este esquema, las diferentes fracciones como (a) solución desionizada, (b) solución de cationes y (c) solución de aniones. (Samuelson, 1963)

Figura 2. Separación por medio de un intercambiador aniónico

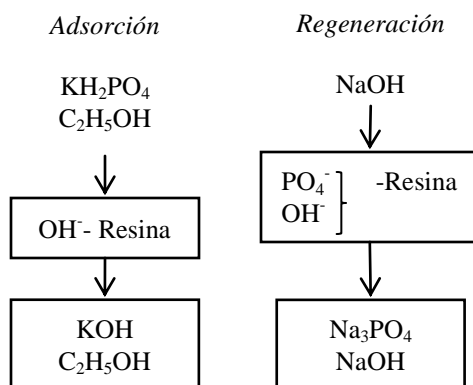
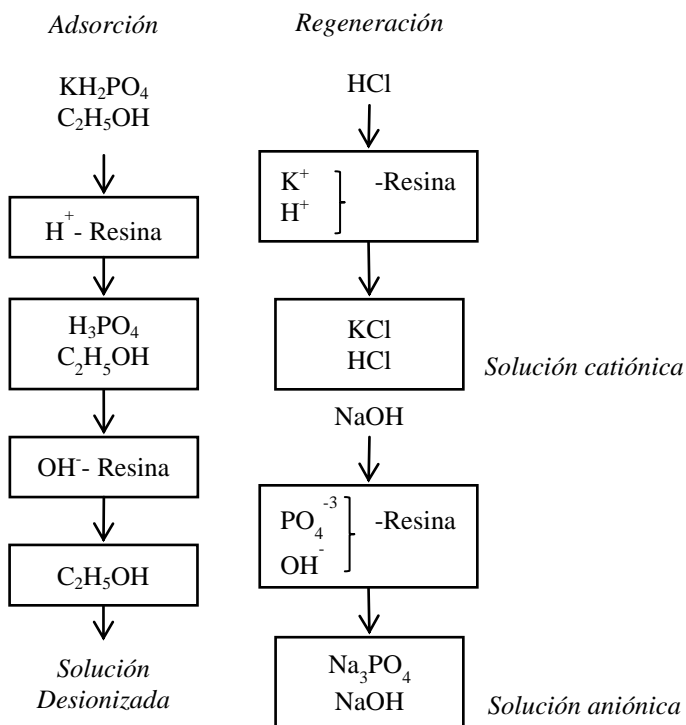


Figura 3. Deionización en dos etapas

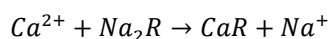


La mayoría de separaciones analíticas realizadas por el método de intercambio iónico también se pueden realizar por otras operaciones, e.g., precipitación, extracción, destilación o diálisis. Las ventajas del método

de intercambio iónico es que el trabajo es más simple y consume menos tiempo, y en muchas operaciones se obtiene mayor exactitud. Los resultados se obtienen a veces más rápido, lo cual es de gran relevancia, e.g. en el análisis de rutina de productos industriales. (Samuelson, 1963)

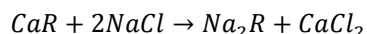
Otra ventaja el método de intercambio iónico es que demanda menos habilidad y juicio del analista que otros métodos. Cuando se realiza una separación por precipitación, siempre existe el riesgo de una coprecipitación, y con pequeñas variaciones errores considerables se pueden producir. El método de intercambio iónico es excepcionalmente insensible a las condiciones variables del medio por lo que se puede trabajar con un amplio margen de seguridad. De forma similar, en la práctica es de gran ventaja el poder dejar la muestra, en la mayoría de casos sin riesgo de interferencias, y continuar el análisis después en un tiempo más conveniente. (Samuelson, 1963)

4. **Historia del intercambio iónico.** Los sólidos intercambiadores de iones que se utilizaron inicialmente fueron minerales porosos, naturales o sintéticos, que contenían sílica: las zeolitas, como por ejemplo el mineral $\text{Na}_2\text{O}, \text{Al}_2\text{O}_3, 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Los iones cargados positivamente (cationes) de una solución que son capaces de difundirse a través de los poros se intercambian con los iones Na^+ de este mineral; por lo tanto, este último se llama un intercambiador de cationes. Por ejemplo,



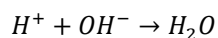
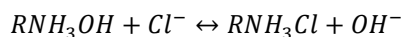
(Treybal, 1988)

Donde R representa el residuo de la zeolita. De esta manera, se puede ablandar agua “dura” que contiene Ca^{2+} poniéndola en contacto con la zeolita; el menos problemático Na^+ reemplaza al Ca^{2+} en solución y este último queda inmovilizado en el sólido. La reacción es reversible, y después de la saturación de la zeolita con Ca^{2+} , aquella puede regenerarse poniéndola en contacto con una solución salina.



(Treybal, 1988)

Las primeras aplicaciones de los intercambiadores iónicos que utilizaron estos principios estaban bastante limitadas a los problemas de ablandamiento de agua. En 1935, se introdujeron los intercambiadores iónicos de resinas sintéticas. Por ejemplo, puede considerarse que ciertas resinas poliméricas insolubles, sintéticas, que contienen un grupo sulfónico, carboxílico o fenólica, constan de un anión muy grande y un catión reemplazable o intercambiable. Éstos pueden presentar intercambios del siguiente tipo,



(Treybal, 1988)

En donde RNH, representa la parte catiónica inmóvil de la resina. Estas resinas pueden regenerarse por contacto con soluciones de carbonato o hidróxido de sodio. Las resinas sintéticas intercambiadoras de iones se encuentran en gran variedad de formulaciones de diferente poder intercambiador; generalmente, se encuentran en la forma de sólidos o perlas granulares, finos, de 16 a 325 mallas. Con frecuencia, cada perla es una esfera perfecta. (Treybal, 1988)

5. Resinas intercambiadoras de iones. De las resinas actuales, las resinas de intercambio catiónico más importantes contienen grupos de ácido sulfónico que se disocian en medio ácido o básico. Estas resinas son un tipo de ácido débil, particularmente aquellas que contienen grupos carboxilo, son usadas para fines analíticos. La fórmula química de las resinas en forma de sodio puede ser representada esquemáticamente como:

- Tipo ácido sulfónico: $\text{R}_s\text{SO}_3\text{-Na}^+$
- Tipo ácido carboxílico: $\text{R}_s\text{COO}^-\text{Na}^+$

Los grupos ionógenos están fijados a la matriz de la resina. Los iones con carga opuesta pueden ser intercambiados por otros iones. Por lo tanto las resinas de intercambio catiónico pueden ser consideradas como aniones polivalentes con iones opuestos cargados positivamente. (Samuelson, 1963)

Las resinas de intercambio aniónico pueden ser consideradas como cationes polivalentes con iones opuestos cargados negativamente. Las propiedades básicas de estas resinas se deben a la presencia de grupos amino, grupos amino sustituidos o grupos de amonio cuaternario. Las resinas que contienen estos últimos son electrolitos fuertes, i.e., resinas de base fuerte; aquellas con grupos aminos son de carácter básico débil. (Samuelson, 1963)

Dado que los grupos ionógenos son hidrofílicos, tienden a disolverse cuando la resina se pone en contacto con agua y dado que los grupos están unidos en la matriz de la resina, tienen a extraer todo el polímero en la solución. Para prevenir la disolución, la resina intercambiadora se mantiene unida con entrecruzamientos que forman una red tridimensional de polímero. La red de su estructura suprime la tendencia de la resina a disolverse, con la característica que se hincha pero permanece sin disolverse. (Samuelson, 1963)

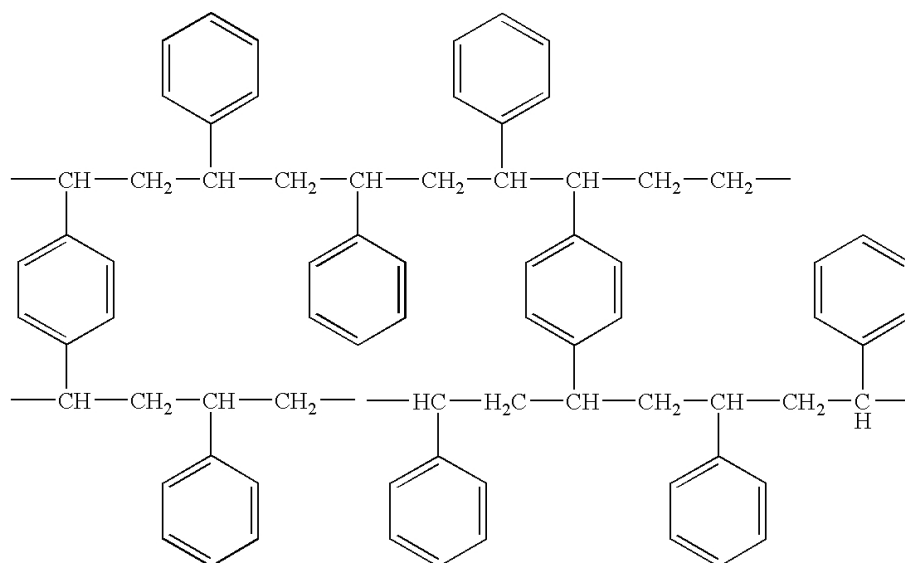
Las resinas de intercambio iónico pueden prepararse por la introducción de grupos ionógenos dentro de una red de polímero o por polimerización de moléculas con grupos ionógenos bajo condiciones adecuadas para que se forme una resina entrecruzada. Ambos métodos se usan a escala comercial. (Samuelson, 1963)

a. Intercambiadores catiónicos: Las primeras resinas comerciales de ácido sulfónico se produjeron en la industria *Wolfen* en Alemania bajo el nombre comercial de *Wofatit*. Los productos se hicieron por condensación de ácidos sulfónicos aromáticos, e.g., ácido fenolsulfónico con formaldehído. Dado que las resinas contienen grupos de ácido sulfónico y grupos fenólicos, son bifuncionales. Las resinas se producen bajo la forma de gránulos duros y oscuros de forma irregular. (Samuelson, 1963)

Estas resinas fenólicas han sido usadas para un gran número de aplicaciones analíticas, pero las resinas más modernas de estireno-divinilbenceno son, por muchas razones, más atractivas para la Química Analítica. Estas resinas se producen por sulfonación de un copolímero de estireno con divinilbenceno. En este copolímero el divinilbenceno se entrecruza entre las cadenas del estireno polimerizado. Nótese que la cantidad relativa de divinilbenceno puede ser ajustado y las resinas comerciales con diferentes niveles de entrecruzamiento están disponibles en el mercado. A mayor cantidad de divinilbenceno utilizado, más frágil será el polímero. El grado de entrecruzamiento está definido en términos de porcentaje de divinilbenceno añadido durante la polimerización. Algunos productores indican esta cantidad en el paquete

del producto con un número precedido por una X. Por ejemplo, *Dowex 50 X8* significa que la resina sulfonada *Dowex 50* tiene ocho por ciento de divinilbenceno agregado en el proceso de polimerización. La mayoría de resinas comerciales están hechas de copolímeros de estireno, etilvinilbenceno y divinilbenceno. (Samuelson, 1963)

Figura 4. Estructura química de la resina de estireno-divinilbenceno

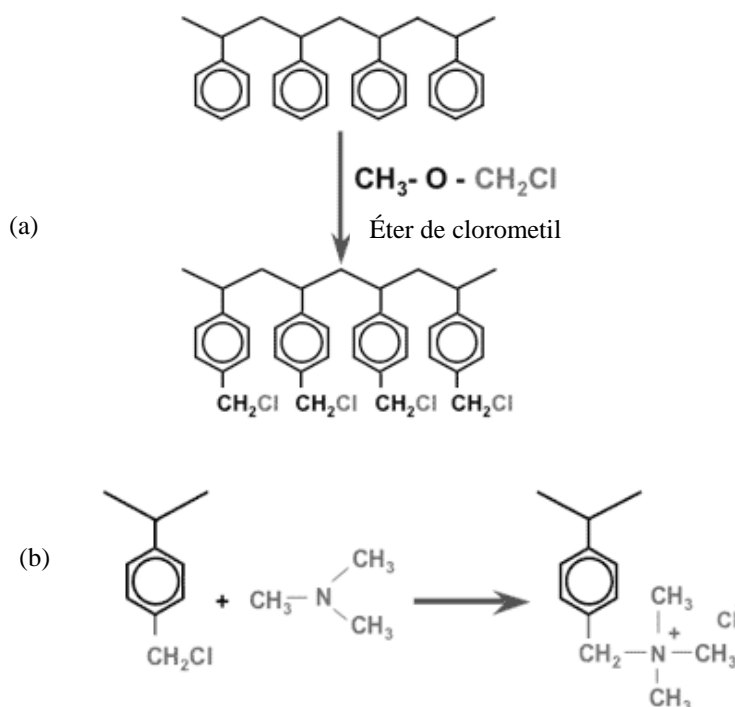


El copolímero se puede preparar en una polimerización de perla, de la cual se obtiene en forma de cuentas casi esféricas; y después de la introducción de grupos ionógenos, las partículas mantienen esta forma de perla. Mucho esfuerzo se ha realizado para evitar el rompimiento y agrietamiento de las resinas y poder venderse así en perlas enteras. (Samuelson, 1963)

La sulfonación se realiza con ácido sulfúrico y, en promedio, cerca de un grupo de ácido sulfónico se encuentra presente por cada anillo de benceno en este tipo de productos comerciales. Esto representa una capacidad de intercambio de aproximadamente cinco miliequivalentes por cada gramo seco de resina en forma de H^+ . Estas resinas pueden ser consideradas monofuncionales dado que no tiene otros grupos funcionales presentes. Puede haber, sin embargo, varias resinas comerciales que contienen cantidades apreciables de grupos carboxilo producto de la oxidación que ocurre durante la etapa de sulfonación, pero se ha hecho un gran esfuerzo para que estas resinas trabajen como monofuncionales. (Samuelson, 1963)

b. Intercambiadores aniónicos: la mayoría de los intercambiadores aniónicos son producidos por la introducción de grupos intercambiadores unidos estructuralmente a resinas de poliestireno-divinilbenceno. El método más importante de preparación de las resinas fuertemente básicas está basado en el siguiente principio. Primero, grupos de cloruro de metilo se introducen al copolímero por un tratamiento con éter de clorometil, en presencia de un agente expansivo. El tratamiento de las resinas clorometiladas con aminas terciarias, e.g., trimetilamina, produce una sal cuaternaria de amonio, i.e., la forma de cloruro de una resina intercambiadora fuertemente básica. (Samuelson, 1963)

Figura 5. Clorometilización (a) y la introducción de grupos de amonio cuaternarios (b) en resinas de estireno-divinilbenceno.



Algunas resinas como Dowex 1 son tan fuertemente básicas que una cantidad considerable de soda cáustica se necesita para convertir la resina en una forma libre de base. En algunos casos se necesita una resina que pueda ser regenerada fácilmente, y que aun así se comporte como intercambiador fuertemente básico. Esta resina se obtiene cuando un grupo hidroxietil ($-C_2H_4OH$) se une a un átomo de nitrógeno en lugar de uno de los grupos metil, i.e., cuando la aminación se realiza con N,N-dimetil-etanolamina en lugar de trimetilamina. (Samuelson, 1963)

Si los productos clorometilados son tratados con amoniaco, aminas primarias o aminas secundarias, es posible obtener resinas débilmente básicas. (Samuelson, 1963)

Intercambiadores aniónicos del tipo estireno-divinilbenceno están disponibles en el mercado con diferentes grados de entrecruzamiento. Un grado bajo se desea para la captura de iones grandes. (Samuelson, 1963)

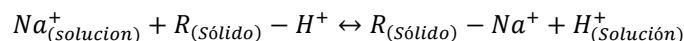
6. Técnicas y aplicaciones. Por lo general, todas las técnicas de operación utilizadas para la adsorción se utilizan también para el intercambio iónico. Por consiguiente, hay tratamientos por lotes o por etapas de soluciones, operaciones en lecho fluidizado o fijo y operaciones continuas a contracorriente. Las percolaciones en lecho fijo son muy comunes. Se han utilizado los métodos cromatográficos para el fraccionamiento de mezclas iónicas de varios componentes. Se han aplicado estas técnicas en el tratamiento de lodos de minerales (“resina en pulpa”) para la obtención de metales valiosos. (Treybal, 1988)

Además de las aplicaciones en el ablandamiento de aguas, la deionización total del agua se puede lograr por percolación, primero a través de un intercambiador catiónico y después a través de un intercambiador

aniónico. Utilizando un lecho formado por una mezcla íntima de cantidades equivalentes de una resina intercambiadora catiónica fuerte y una aniónica fuerte, es posible la eliminación simultánea de todos los iones hasta la neutralidad. Para la regeneración, estas resinas en lecho mixto se separan mediante clasificación hidráulica por tamaño de partícula y diferencias de densidad para los dos tipos de resinas, las cuales se regeneran por separado. Los intercambiadores iónicos también se han utilizado para el tratamiento y concentración de soluciones de desecho diluidas. Tal vez la aplicación más notable de las resinas intercambiadoras es la separación de metales de las tierras raras mediante técnicas cromatográficas. (Treybal, 1988)

En la exclusión iónica, se presatura una resina con los mismos iones que en una solución. Entonces, la resina puede rechazar los iones en una solución y al mismo tiempo adsorber sustancias orgánicas no iónicas como glicerina y similares, que también pueden estar en solución. Posteriormente, la materia orgánica puede extraerse de la resina en un estado iónico libre. (Treybal, 1988)

7. **Equilibrio.** La distribución en el equilibrio de un ión entre un sólido intercambiador y una solución puede describirse gráficamente trazando isotermas. Algunas veces se han aplicado diferentes ecuaciones empíricas a estas isotermas, como la ecuación de Freundlich. También es posible aplicar ecuaciones del tipo de la ecuación de acción de masas a la reacción de intercambio. Por ejemplo, para el intercambio catiónico



(Treybal, 1988)

La constante de la ley de acción de masas es

$$\alpha = \frac{[R - Na^+]_{sólido} [H^+]_{solución}}{[R - H^+]_{sólido} [Na^+]_{solución}} = \left[\frac{Na^+}{H^+} \right]_{sólido} \left[\frac{H^+}{Na^+} \right]_{solución}$$

Ecuación 2

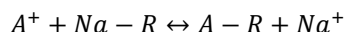
En donde los paréntesis cuadrados [] indican el uso de alguna unidad adecuada de concentración en el equilibrio. Entonces, se ve que α es una expresión de la adsortividad relativa del Na^+ al H^+ . Puesto que la solución y el sólido permanecen eléctricamente neutros durante el proceso de intercambio, se puede escribir

$$\alpha = \frac{X}{X_0 - X} \frac{c_0 - c^*}{c^*} = \frac{X/X_0}{1 - X/X_0} \frac{1 - c^*/c_0}{c^*/c_0}$$

Ecuación 3

En donde c_0 es, en este caso, la concentración inicial de $Na^+ + H^+$ en la solución y, en consecuencia, el total de éstos en cualquier momento; c^* es la concentración de Na^+ en el equilibrio después del intercambio; X , la concentración en el equilibrio de Na^+ en el sólido; X_0 , la concentración si todo H^+ se reemplazase con Na^+ ; todos esos valores se expresan como equivalentes por unidad de volumen o masa. En el caso general para cualquier sistema, la adsortividad relativa α a una temperatura dada varía con la concentración catiónica total c_0 en la solución y también con c . En algunos casos, se ha encontrado que α es básicamente constante al variar c con c_0 fija. (Treybal, 1988)

Considere el intercambio catiónico de una resina con forma de sodio (Na-R) con ion monovalente, como se muestra a continuación:



(Treybal, 1988)

8. Penetración de electrolitos a las resinas intercambiadoras. La rapidez del intercambio iónico depende, como la adsorción ordinaria, de la rapidez de cada uno de los siguientes procesos: (1) difusión de iones desde el seno del líquido hasta la superficie externa de una partícula intercambiadora; (2) difusión interna de iones a través del sólido hasta el sitio de intercambio; (3) intercambio de los iones; (4) difusión externa de los iones liberados hasta la superficie del sólido; (5) difusión de los iones liberados desde la superficie del sólido hasta el líquido. En algunos casos, la cinética de la reacción de intercambio (3) puede ser el paso que controle, pero en otros la rapidez de la reacción aparentemente es muy rápida en comparación con la rapidez de difusión. La rapidez de difusión puede describirse mediante los coeficientes de transferencia de masa apropiados para la difusión a contracorriente equivalente a través del sólido y a través del líquido; en algunos casos, por lo menos, parece que la resistencia a la difusión en la fase líquida es el paso controlante. (Treybal, 1988)

Cuando las reacciones de intercambio son rápidas en comparación con la rapidez de la transferencia de masa, los métodos de diseño desarrollados para los adsorbedores tradicionales pueden aplicarse directamente a las operaciones de intercambio iónico. Puede ser adecuada alguna modificación de las unidades de los términos en las diferentes ecuaciones, debido al uso acostumbrado de las concentraciones expresadas como equivalentes por unidad de volumen en el sistema cgs. (Treybal, 1988)

9. Eliminación adecuada de las resinas intercambiadoras de iones. Para cumplir los objetivos de este estudio y en muchas aplicaciones industriales que utilizan resinas intercambiadoras de iones, comúnmente se necesita descartar las resinas usadas y reemplazarlas por nuevas. Las resinas de intercambio tienen un tiempo de vida indicado por el proveedor en el que se pueden reutilizar tras una regeneración adecuada. Sin embargo, la regeneración cada vez es menos efectiva y se crea la necesidad de descartar el polímero luego de un tiempo determinado. La forma apropiada de eliminar las resinas de intercambio usadas está regida principalmente por regulaciones ambientales locales y municipales. Para satisfacer estas regulaciones se requiere contactar primero al Ministerio de Ambiente local para solicitar especificaciones y los procedimientos que debe seguirse, según los datos de toxicidad de las resinas de intercambio. Las mejores opciones de descarte son por incineración y deposición en un relleno sanitario. (Purolite, 2002)

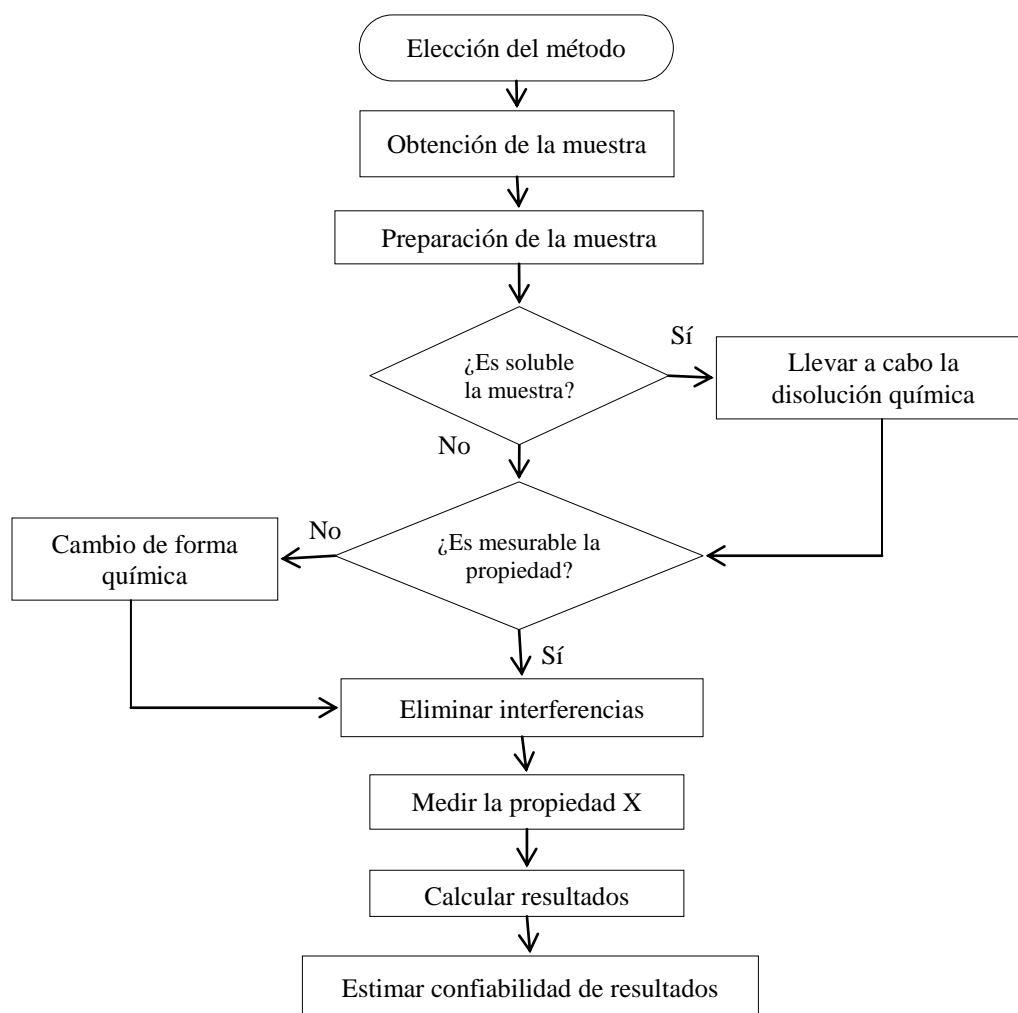
En algunos países la empresa Purolite presta un servicio especial para eliminar las resinas de intercambio usadas. Este servicio es más barato que los servicios de incineración y tiene un menor impacto ambiental negativo. Sin embargo, este servicio no está disponible en Guatemala por lo que la mejor opción en la región es incinerar los residuos. (Purolite, 2002)

B. Marco teórico de Química Analítica

Los resultados de un análisis cuantitativo típico se calculan a partir de dos medidas. Una es la masa o volumen de la muestra analizada. La segunda es la medida de alguna cantidad proporcional a la del analito en la muestra, como masa, volumen, intensidad luminosa o carga eléctrica. Esta segunda medida, generalmente, completa el análisis y su naturaleza sirve de base para clasificar los métodos analíticos. Los métodos espectroscópicos se basan en la medida de la interacción de la radiación electromagnética con los átomos o moléculas o en determinar la producción de tal radiación por el mismo analito. (Skoog, 2005)

1. Un análisis cuantitativo típico. Un análisis cuantitativo típico incluye la secuencia de pasos que se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 6. En algunos casos, se puede omitir uno o más de esos pasos. (Skoog, 2005)

Figura 6. Diagrama de flujo con los pasos del análisis cuantitativo



a. La elección del método: El primer paso esencial de todo análisis cuantitativo es la elección de un método. Es una elección a veces difícil y que requiere experiencia al igual que intuición. Uno de los primeros factores que se considera es el grado de exactitud necesario. Desgraciadamente, la alta fiabilidad casi siempre requiere invertir mucho tiempo. El método elegido suele ser un término medio entre la exactitud necesaria, por un lado, y el tiempo y dinero disponibles para el análisis, por el otro. (Skoog, 2005)

Una segunda consideración relacionada con los factores económicos es el número de muestras que se analizará. Si son muy numerosas, es posible dedicar un tiempo significativo a operaciones preliminares, como las de montaje y calibración de instrumentos y equipo, así como a la preparación de soluciones estándar o patrones. En el supuesto de que sólo se tengan una o pocas muestras, sería más apropiado optar por un procedimiento con el que se dediquen o minimicen esos pasos preliminares. Por último, la complejidad de la muestra y el número de sus componentes siempre influyen en algún grado en la elección del método. (Skoog, 2005)

b. Obtención de la muestra: A fin de tener información significativa, debe efectuarse el análisis de una muestra que tenga la misma composición que el resto de material del cual se obtuvo. Cuando dicho material es grande y heterogéneo, se requiere mucho esfuerzo para obtener una muestra representativa. El muestreo es el proceso para obtener una pequeña masa de un material cuya composición represente con exactitud a todo el material muestreado. (Skoog, 2005)

c. Preparación de la muestra: Una muestra de laboratorio sólida se tritura para disminuir el tamaño de partícula, se mezcla para garantizar su homogeneidad y se almacena durante diferentes periodos antes de proceder a su análisis. La absorción o desorción de agua se puede hacer en cada paso, según la humedad ambiental. La pérdida o ganancia de agua modifica la composición química de los sólidos, por lo que es conveniente desecar las muestras justo antes del análisis. También, el contenido de humedad de la muestra puede determinarse en el mismo momento del análisis con procedimiento analítico aparte. (Skoog, 2005)

Muchos análisis se llevan a cabo con réplicas de muestras, cuya masa o volumen se determinan con mediciones cuidadosas en las que se use una balanza analítica o un dispositivo volumétrico preciso. La realización de réplicas mejora la calidad de los resultados y constituye una medida de fiabilidad. Las medidas cuantitativas de réplicas de muestras suelen promediarse y luego se aplican diversas pruebas estadísticas a los resultados para establecer la fiabilidad. (Skoog, 2005)

La mayoría de análisis se llevan a cabo en disoluciones de la muestra preparadas con un disolvente adecuado. En teoría, el disolvente debe disolver toda la muestra, incluido el analito, de manera rápida y completa. Las condiciones de disolución deben ser tales que resulten imposibles las pérdidas del analito. Lo más frecuente es que, antes de la medición, se debe eliminar interferencias en la muestra. (Skoog, 2005)

d. Eliminación de interferencias: Una vez que la muestra está disponible en disolución y se ha convertido el analito en una forma apropiada para su medida, el paso siguiente es eliminar sustancias de la muestra que interfieran en su medida. Pocas propiedades químicas o físicas de importancia en el análisis

químico son exclusivas de una especie química. Por el contrario, las reacciones utilizadas y las propiedades medidas son características de un grupo de elementos o compuestos. Las especies ajenas al analito con efecto en la medida final se llaman interferencias o interferentes. Debe idearse un plan para aislar los analitos de las interferencias antes de emprender una medida final. No se cuenta con reglas generales para la eliminación de interferencias; de hecho, la resolución de este problema puede ser el aspecto más difícil de un análisis. (Skoog, 2005)

e. **Calibración y medida de la concentración:** Todos los resultados analíticos dependen de una medición final X de una propiedad física o química de un analito. Esta propiedad varía de manera conocida o reproducible con la concentración, C_A , del analito. En teoría, la medida de la propiedad es directamente proporcional a la concentración, es decir:

$$C_A = kX$$

Ecuación 4

Donde k es la constante de proporcionalidad. Salvo dos excepciones, los métodos analíticos que requieren la determinación empírica de k con estándares o patrones químicos cuya C_A es conocida. Así el proceso de determinación de k es un paso importante en la mayoría de los análisis., paso conocido con el nombre de calibración. (Skoog, 2005)

La concentración molar C_X de una especie química X en disolución X es el número de moles de la especie contenida en 1L de la disolución. La unidad de concentración molar es la molaridad M , que tiene las dimensiones de mol L⁻¹. La molaridad también expresa el número de milimoles de soluto por mililitro de disolución.

$$C_x = \frac{\text{moles de soluto}}{\text{L de disolución}} = \frac{\text{milimoles de soluto}}{\text{mL de disolución}}$$

Ecuación 5

En el caso de disoluciones muy diluidas, una forma útil de expresar la concentración es en partes por millón (ppm):

$$C_{ppm} = \frac{\text{masa de soluto}}{\text{masa de disolución}} \times 10^6 ppm$$

Ecuación 6

Donde c_{ppm} es la concentración en partes por millón. Por supuesto, deben concordar las unidades de masa en el numerador y denominador. En el caso de las soluciones incluso más diluidas, en la ecuación precedente se usarían 109 ppb en lugar de 106 para dar resultados en partes por billón. (Skoog, 2005)

f. **Cálculo de resultados:** Calcular las concentraciones de analitos a partir de datos experimentales suele ser relativamente sencillo, en particular con las calculadoras modernas y computadores. Este paso se basa en datos experimentales iniciales obtenidos en el paso de medida, las características de los instrumentos de medida y la estequiometría de la reacción analítica. (Skoog, 2005)

g. **Evaluación de resultados por estimación de su fiabilidad:** Los resultados analíticos están incompletos sin una estimación de fiabilidad. El experimentador debe proporcionar alguna medida de

la incertidumbre relacionada con los cálculos obtenidos si se pretende que los datos revistan valor. (Skoog, 2005)

Debido a que un análisis no aporta información sobre la variabilidad de los resultados, los químicos someten varias porciones (de dos a cinco) (duplicados o réplicas) de una muestra a un procedimiento analítico completo. Cada uno de los resultados de un conjunto de medidas tiende a ser distinto de los demás, así que por lo general se considera a la “mejor” estimación como el valor central del conjunto. Son dos las maneras de justificar el esfuerzo adicional requerido para analizar varias muestras. En primer término, el valor central del conjunto debe ser fiable que cualquiera de los resultados. Normalmente, se usa la media o mediana como valor central de un conjunto de mediciones duplicadas. En segundo lugar, el análisis de la variación de los datos permite estimar la incertidumbre relacionada con el resultado central. (Skoog, 2005)

La medida de tendencia central más utilizada es la media, \bar{x} . Ésta se conoce también como media aritmética o promedio, y se obtiene al dividir la suma de las medidas duplicadas entre el número de medidas del conjunto.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

Ecuación 7

Donde x_i representa cada uno de los valores de x que componen el conjunto de N medidas de las réplicas. (Skoog, 2005)

2. **Detección de errores sistemáticos de método.** La predisposición en un método analítico es de identificación particularmente. Para diferenciarlo de un error sistemático puede ser necesario recurrir a uno o más de los pasos siguientes:

a. **Análisis de muestras estándar:** La mejor forma de estimar la predisposición de un método analítico es mediante el análisis de materiales de referencia certificados, los cuales contienen uno o más analitos en concentraciones conocidas. Y se pueden obtener de diversas maneras. Los materiales o patrones certificados a veces se pueden preparar mediante síntesis. En tal caso, se mezclan cantidades medidas de los componentes puros de un material de tal manera que se obtenga una muestra homogénea cuya composición se conoce en base a las cantidades utilizadas. La composición global de un material patrón o estándar sintético debe ser muy aproximada a la de las muestras que se analizan. Hay que tener mucho cuidado para asegurar que la concentración del analito se conoce con exactitud. Los patrones sintéticos, desafortunadamente, no siempre revelan la presencia de interferencias inesperadas, con lo que se desconocería la exactitud en las determinaciones. Por consiguiente, esta estrategia resulta con frecuencia no muy práctica. (Skoog, 2005)

b. **Análisis independientes:** Si no hay muestras patrón disponibles, se puede utilizar un segundo método analítico independiente y seguro paralelamente al método que se evalúa. El método independiente debe ser lo más diferente del puesto a estudio. Con esto se reduce la posibilidad de que algún factor común de la muestra tenga el mismo efecto en ambos métodos. Una vez más, es necesario utilizar

una prueba estadística para determinar si alguna diferencia entre ambos es el resultado de errores aleatorios en los dos métodos o se debe al sesgo o predisposición en el método sometido a estudio. (Skoog, 2005)

c. **Determinaciones blanco:** Un blanco contiene los reactivos y disolventes utilizados en una determinación, no así el analito. Es frecuente que muchos de los componentes de la muestra se agreguen para simular el ambiente del analito, frecuentemente llamado matriz de la muestra. En una determinación del blanco, todos los pasos del análisis se realizan en el material blanco. Los resultados se aplican después para corregir las medidas en la muestra. Las determinaciones blanco revelan errores debidos a contaminantes e interferentes de reactivos y recipientes utilizados en el análisis. (Skoog, 2005)

3. **Tratamiento estadístico del error aleatorio.** El análisis estadístico de los datos analíticos se basa comúnmente en la suposición que los errores aleatorios siguen una distribución gaussiana, o normal. Se logra una mejor aproximación con un gran número de experimentos. (Skoog, 2005)

a. **Muestra y población:** Un estudio científico representativo proporciona la información la información característica de una población o universo a partir de las observaciones realizadas en un subconjunto o muestra. La población es el conjunto de todas las medidas de interés que el experimentador debe definir con cuidado. En algunos casos la población es finita y real, pero en otros es hipotética o de naturaleza conceptual. (Skoog, 2005)

En las curvas de Gauss se traza una gráfica de frecuencia relativa (y) de varias desviaciones respecto a la media en función de esta desviación. Estas curvas se pueden representar por medio de una ecuación que contiene sólo dos parámetros: la media poblacional μ y la desviación estándar de la muestra σ . El término parámetro se refiere a las cantidades como μ y σ que definen una población o distribución. En contraste, las cantidades como los valores de x son variables. El término variable estadística se refiere a la estimación de un parámetro, que se hace con los datos de una muestra. La media de la muestra y la desviación estándar de la muestra son ejemplos de variables estadísticas que estiman los parámetros μ y σ . (Skoog, 2005)

b. **La media de la población μ y la media de la muestra \bar{x} :** Es útil diferenciar entre la media de la muestra \bar{x} y la media de la población. La media de la muestra \bar{x} es el promedio aritmético de una muestra limitada extraída de una población de datos. La media de la muestra se define como la suma de los valores medidos dividida entre el número de medidas, como se muestra en la Ecuación 7. En la ecuación N representa el número de medidas de la muestra. Por otro lado, la media de la población μ es el verdadero valor promedio de la población. Cuando no hay error sistemático, la media de la población también es el verdadero valor de la cantidad medida. Para remarcar la diferencia entre las dos medias, a media de la muestra se representa con \bar{x} y la media de a población con μ debido a que una muestra pequeña de datos no es representativa de la población. La diferencia entre \bar{x} y μ disminuye rápidamente a medida que aumenta el número de medidas que forman la muestra; por lo general, esta diferencia es insignificante cuando N se acerca a 20 o 30. (Skoog, 2005)

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

c. **Desviación estándar de la población:** La desviación estándar de la población (σ) es una medida de la precisión de una población de datos y se calcula mediante la ecuación, donde N es el número de datos que forman una población. (Skoog, 2005)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}}$$

Ecuación 9

d. **Desviación estándar de la muestra:** La Ecuación 9 debe modificarse cuando se aplica a una muestra pequeña de datos. Entonces, la desviación estándar de la muestra, s , viene dada por la ecuación:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

Ecuación 10

Donde la cantidad $(x_i - \bar{x})$ representa a desviación de x_i del valor de la media \bar{x} . Debe observarse que la media de la muestra \bar{x} aparece en el numerador en lugar de la media de la población, μ . Además, se sustituye N de la Ecuación 9 por el número de grados de libertad ($N-1$). Cuando se usa $N-1$ se dice que s es un estimador no sesgado de la desviación estándar de la población, σ . Si no se utiliza esta sustitución, la s calculada será menor, en promedio, que la verdadera desviación estándar σ ; es decir, s tendrá un sesgo negativo. (Skoog, 2005)

e. **Coefficiente de variación:** Con frecuencia los químicos se refieren más a la desviación estándar en términos relativos que en términos absolutos. La desviación estándar relativa se calcula al dividir la desviación estándar entre la media del conjunto de datos. A la desviación estándar relativa multiplicada por 100% se le conoce como coeficiente de variación (CV). (Skoog, 2005)

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\%$$

Ecuación 11

C. Marco teórico de Química de suelos

Los suelos son creados en las superficies terrestres por procesos climáticos que incluyen fenómenos químicos, geológicos, hidrológicos y, únicamente en el planeta Tierra, fenómenos biológicos. La continua influencia de percolación de agua y la biota producen una estratificación vertical, o perfil de suelo, de la concentración de elementos y compuestos químicos. La fase sólida de los suelos está compuesta de dos grandes clasificaciones: compuestos inorgánicos (minerales) y materia orgánica. La corteza de la Tierra contribuye los elementos químicos presentes en el componente mineral mientras que los elementos dominantes en la materia orgánica son derivados del CO_2 y agua contribuidos por la atmósfera a través de su utilización por la biota. Las proporciones entre los componentes minerales y orgánicos de los suelos pueden variar mucho. Por ejemplo, suelos con texturas carbonosas contienen menos de 1% de materia orgánica mientras que los suelos orgánicos contienen hasta 95% de materia orgánica. (Sumner, 2000)

Las variaciones en la composición química de suelos resultan principalmente de la proporción entre contenidos de materia orgánica y minerales, y también de la variabilidad de los tipos de compuestos que constituyen la fracción mineral. Parte de la variación en la concentración de elementos en la fracción mineral proviene de las variaciones en la composición del material del suelo progenitor, granita contra basalto por ejemplo. Además las diferencias de composición de suelos resultan del flujo de materia y energía que entra y sale del suelo durante el tiempo geológico, dado que los suelos son sistemas abiertos biogeoquímicos. Algunos de los flujos importantes de elementos que más afectan la composición química de los suelos es la pérdida de cationes por lixiviación, la pérdida o ganancia de yeso por procesos de transporte pluvial y eólicos, y para los elementos activos en los procesos biológicos, el enriquecimiento sobre la superficie terrestre. (Sumner, 2000)

Es útil clasificar a los elementos como mayores o elementos de traza, cuando se discute sobre las concentraciones de elementos en suelos y rocas. La distinción entre estos dos grupos no es siempre exacta, pero los elementos mayores son caracterizados por estar presentes a concentraciones suficientes para formar fases discretas que pueden determinar las propiedades de suelos y rocas. Los elementos traza se encuentran a concentraciones tan bajas que no forman fases discretas o estas fases están a una abundancia tan inconsecuente que no contribuyen a las propiedades del sistema total. Sólo los ocho elementos, O, Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na y K se encuentran a una concentración que excede el 1% de la corteza terrestre y se clasifican siempre como elementos mayores. Los mismos elementos, más el carbono C son los elementos más abundantes en los suelos. Todos estos elementos juntos forman sólo un pequeño porcentaje de la corteza terrestre y el suelo. (Sumner, 2000)

Puede parecer sorprendente que las concentraciones de elementos y sus proporciones relativas en los suelos modernos de la Tierra reflejan todavía las abundancias relativas de los elementos cuando fueron formados por los procesos de nucleosíntesis en las estrellas antiguas. La abundancia predominante de los elementos con números atómicos bajos y la ocurrencia de los elementos de traza de los elementos pesados, se aprecian mejor con una comprensión de los procesos responsables de la formación de los elementos. Las propiedades nucleares de los diferentes isótopos de cada elemento y los procesos de nucleosíntesis restringen el rango de concentraciones de elementos en suelos y rocas por la influencia de la producción original de elementos en las estrellas. (Sumner, 2000)

1. Técnicas para el análisis de elementos de suelo:

a. **Análisis de suelo:** Determinar la concentración de los elementos en suelos no es un esfuerzo trivial. Los suelos son una mezcla de compuestos orgánicos e inorgánicos que tienen propiedades volátiles y refractarias. Algunos de estos compuestos resisten a disolverse por simples tratamientos de ácidos fuertes o agentes oxidantes. Cuidado especial se debe tener para asegurar que las muestras de suelo se encuentran completamente disueltas en la preparación para procedimientos analíticos que requieren muestras acuosas. (Sumner, 2000)

b. **Tratamiento de muestra:** Las muestras de suelo son generalmente secadas en la preparación para el análisis. Los suelos secos tienen una composición más estable que los húmedos durante

el almacenamiento, y algunas técnicas analíticas requieren muestras completamente libres de agua. Los tratamientos más comunes de secado son: no secado (los suelos se retienen en su contenido húmedo de campo), secado a temperatura ambiente, secado en horno de 105°C a 110°C, y un calentamiento hasta ignición de 400°C a 600°C. El secado en horno resulta en la pérdida de mercurio de metil y otros compuestos. El calentamiento hasta temperaturas de ignición se utiliza cuando se desea remover toda la parte orgánica para ciertos análisis que así lo requieran. (Sumner, 2000)

c. Disolución de muestra: muchas técnicas analíticas requieren que la muestra se diluya. Esto puede ser un reto difícil para las muestras de suelo porque los materiales orgánicos e inorgánicos requieren diferentes tratamientos previos para su disolución. El método más fácil es la disolución de la muestra después del calentamiento hasta ignición porque toda la fase orgánica ha sido removida. El tamizado de la muestra con un Mesh plástico número 100 ayuda a asegurar la disolución completa. Un tratamiento secuencial del suelo con HF y NHNO_3 también es efectivo. Muestras de suelo que contienen materia orgánica requieren tratamientos con oxidantes fuertes. (Sumner, 2000)

d. Técnicas de espectroscopía óptica: Espectroscopía de emisión por plasma de acoplamiento inductivo (ICP) y la espectrofotometría de absorción atómica (AAS) son las técnicas analíticas más comunes utilizadas actualmente para la determinación de concentraciones de elementos en suelos. El principio básico del AAS es la medición de la absorción de la luz característica de cada elemento, generado por una lámpara catódica al vacío, por los átomos neutros del analito dentro de una llama de la combustión de acetileno en aire. Mientras que el principio de funcionamiento para el ICP consiste en la medición de la luz característica emitida por los elementos excitados con una antorcha de plasma. La sensibilidad para la mayoría de elementos varía desde microgramos hasta nanogramos por litro por estas técnicas. Las muestras deben estar en solución para ambas técnicas. La mayoría de equipos ICP miden elementos simultáneamente mientras que los equipos AAS determinan secuencialmente los elementos. (Sumner, 2000)

2. Suelos de referencia estandarizados. La dificultad en la obtención exacta de los análisis de suelos hacen que sea imperativo el uso de materiales de referencia certificados para validar las técnicas de análisis. Estas muestras han estado disponibles desde finales de 1970s, pero aún pocos analistas utilizan este recurso importante. Los materiales de suelo de referencia más importantes provienen del Centro Canadiense para la Tecnología de Energía y Minerales. Claramente, muchos laboratorios analíticos podrían mejorar significativamente la calidad de sus resultados experimentales si se utilizase estos materiales de referencia. (Sumner, 2000)

3. Variaciones de concentración de elementos entre órdenes de suelo. Los suelos entre un mismo orden de suelo o serie de suelo generalmente no están caracterizados por una composición única de elementos. La concentración de elementos en suelos tiene valores característicos únicamente en pocos órdenes de suelo y usualmente sólo para una pequeña serie de elementos, como hierro en Oxisoles y carbono en Histisoles. Por lo tanto, es imposible dar un valor exacto representativo de las concentraciones de los elementos entre un mismo orden de suelo. (Sumner, 2000)

La composición del material progenitor de suelo es sólo uno de los factores que afectan la composición del suelo, los demás son clima, vegetación, topografía y el tiempo. El sistema actual para clasificar suelos se acentúa en la morfología con menor énfasis en el génesis y en los factores de formación de los suelos. Los factores como clima, vegetación, topografía y tiempo no introducen suficientes patrones confiables de fraccionamiento para usar la concentración de elementos como un criterio útil de clasificación de suelos. Por lo tanto, la mayoría de especialistas en suelos no recolectan datos sobre las composiciones de los elementos en suelos. Esto ha provocado una escasez de datos sobre la composición química de varios suelos que, a la vez, ha provocado que muchos científicos fuera del área de suelos se dediquen recolectar estos datos. (Sumner, 2000)

4. **Concentración de elementos por región geográfica.** Se ha observado que la concentración de elementos en materiales naturales está distribuida en un patrón normal de registros. Por lo tanto, la media geométrica devuelve un mejor estimado del valor más probable dentro de una gran serie de datos. La media aritmética se usa para series pequeñas de datos o en casos donde los suelos están relacionados íntimamente. Los valores promedios de concentraciones de elementos en suelos varían en menos de dos o tres factores a través de regiones geográficas y muchas de los promedios son casi idénticos, especialmente para el cobre. Algunas de las diferencias entre las concentraciones promedio pueden deberse a las diferentes profundidades a las que se tomaron las muestras entre los diferentes estudios. (Sumner, 2000)

Tabla 1. Concentraciones típicas de elementos ($\mu\text{g/g}$ suelo) en suelos de varias regiones geográficas

Elemento	Mundo		China	Escocia	Estados Unidos	
	Promedio	Rango	Promedio	Promedio	Promedio	Rango
P	650			1525	260	40 – 6,800
K	14,000	400 – 30,000	18,000		15,000	50 – 63,000
Ca	13,700	7,000 – 500,000	7,100		9,200	100 – 320,000
Mg	5,000	600 – 6,000	6,400		4,400	50 – 100,000

(Sumner, 2000)

5. **Soluciones de suelo.** Una solución de suelo es el centro de las actividades químicas y biológicas del suelo. Muchas funciones críticas disminuyen significativamente en la ausencia de agua. La adición de humedad a sistemas secados previamente reinicia las reacciones químicas y revive los organismos inactivos. (Sumner, 2000)

La definición más simple de solución de suelo es la fase líquida del suelo que es acuosa. Aunque esta definición técnicamente es correcta, no es significativa para muchas perspectivas biológicas químicas y físicas porque una fracción significativa de la solución de suelo no participa en fenómenos importantes. (Sumner, 2000)

Sólo cinco cationes (Na^+ , K^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} y NH_4^{+}) y cuatro aniones (NO_3^- , HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-}) son los solutos dominantes en casi todas las disoluciones de suelo. Estas especies comúnmente se encuentran en milimoles por litro o a menor concentración en muchos otros suelos. Todos los demás elementos se encuentran a micromoles o concentraciones aún menores por litro. De nuevo, no se debe tratar de obtener valores típicos para los distintos órdenes de suelo. Incluso el contenido de humedad afecta la concentración, así como el método de recolección y la profundidad de muestreo. (Sumner, 2000)

Los constituyentes inorgánicos más comúnmente encontrados en las soluciones de suelo están dados en la Tabla 2. Los suelos que se mezclan con una gran cantidad de agua están influenciados fuertemente por condiciones de reducción y actividades microbianas, y el Fe^{2+} , HS^{-1} y HCO_3^- cobran mayor importancia. En ambientes contaminados, la composición de la solución de suelo cambiará para reflejar los componentes solubles de los contaminantes. (Sumner, 2000)

La sumatoria de cationes solubles no debería sobrepasar los 10^{-2} mol L^{-1} . Entre los cationes, el Ca^{+2} debería formar la mitad de este total. Naturalmente los suelos salinos contendrán concentraciones elevadas de Mg^{+2} , Ca^{+2} , Cl^- y SO_4^{2-} dependiendo del pH y fuente de las sales. La concentración de los constituyentes inorgánicos en las soluciones de suelo está controlada por muchos factores, como pH, potencial redox y la composición de fase sólida. (Sumner, 2000)

Tabla 2. Componentes inorgánicos mayores encontrados en soluciones de suelo

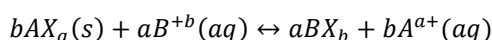
Categoría	Componentes mayores (10^{-4} a 10^{-2} mol L^{-1})	Componentes menores (10^{-6} a 10^{-4} mol L^{-1})	Otros
Cationes	Na^+ , K^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2}	Fe^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , NH_4^+ , Al^{3+}	Cr^{3+} , Ni^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+}
Aniones	HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}	$\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$, F^{-1} , HS^{-1}	CrO_4^{-1} , HMoO_4^+
Neutral	$\text{Si}(\text{OH})_4$	$\text{B}(\text{OH})_3$	

(Sumner, 2000)

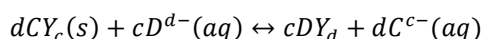
6. Fenómenos de intercambio iónico. Los iones intercambiables pueden ser fácilmente reemplazados por un lavado con una solución electrolítica de composición y concentraciones conocidas y valor de pH específico. Métodos experimentales para determinar los iones intercambiables deben ser capaces de evadir la extracción de iones específicos como Pb^{2+} o HPO_4^{2-} . De esta forma, sólo los iones completamente solvatados en partículas de suelo serán iones intercambiables. La capacidad de intercambio iónico del suelo se define como el número de moles de la carga iónica adsorbida –que puede ser después desorbida– de una unidad másica de suelo, bajo ciertas condiciones de temperatura, presión y composición de la solución de suelo, y la razón de solución másica del suelo. En la mayoría de aplicaciones, una capacidad de intercambio iónico se refiere a la adsorción máxima (exceso de superficie positiva) de los iones intercambiables que se adsorben sobre la superficie de las partículas del suelo de forma independiente en complejos esféricos externos y capas difusas. (Sumner, 2000)

La medida de la capacidad e intercambio iónico involucra el reemplazo de los iones intercambiables originales por un catión o anión indicador cuyo exceso superficial se puede determinar después. Para suelos donde los iones intercambiables son monovalentes o divalentes, los iones indicadores pueden ser Ca^{2+} o Cl^- . A veces se utiliza NH_4^+ como un catión indicador. Sin embargo, este catión forma complejos superficiales dentro de las esferas con 2:1 minerales de la arcilla. El uso de Cl^- es utilizado más frecuentemente porque mantiene características de adsorción no específica. (Sumner, 2000)

De forma estequiométrica, la reacción binaria de intercambio iónico se expresa como sigue:



Ecuación 12



Ecuación 13

Donde a, b, c, y d son coeficientes estequiométricos relacionados a las valencias de los cationes A^{+a} , B^{+b} , o los aniones C^{c-} , D^{d-} , X o Y representan 1 mol de carga negativa o positiva transportada por el intercambiador de suelo, y s significa fase sólida y aq, fase acuosa. La Ecuación 12 hace referencia el intercambio catiónico por el intercambiador Y^+ . Se asume que X⁻ y Y⁺ pueden ser asociados con sólidos cargados en lo que a intercambio iónico se refiere. (Sumner, 2000)

Una constante de equilibrio condicional K_c puede ser formulada para describir la Ecuación 12

$$K_c = \frac{x_B^a(A^{+a})^b}{x_A^b(B^{+b})^a}$$

Ecuación 14. (Sumner, 2000)

D. Marco teórico de Agronomía

1. **Características generales de Guatemala.** El territorio de Guatemala tiene una superficie geográfica de 108,889 km² que se divide en unidades y áreas de relieve, fundamentalmente de acuerdo a su origen geológico y a los rasgos morfogénicos y topográficos diferenciales. Por esta razón, se distinguen en forma general 12 Provincias o Regiones Fisiográficas, según el mapa de formas de la tierra de la República de Guatemala, contenido en el Atlas Nacional, editado por el Instituto Geográfico Nacional. (Ramos, 2003)

En el territorio nacional se encuentran catorce zonas de vida, nueve biomas, cuarenta y tres regiones microclimáticas y una gran variedad de ecosistemas. Al relacionar los factores formadores del suelo: material de origen, relieve, vegetación, organismos, clima, tiempo y la acción del hombre, se explica la diversidad de suelos que existen en el país, con características físicas y químicas diferentes. La actividad productiva puede mejorarse con el uso y manejo de los suelos, lo cual requiere el conocimiento científico y tecnológico que permita el desarrollo de una gran diversidad de cultivos para aumentar la oferta agrícola del país, tanto en el mercado interno como externo. (Ramos, 2003)

2. **Análisis de suelo.** Específicamente, los análisis químicos de suelos consisten en la extracción de los nutrientes del suelo mediante soluciones químicas. Existen muchas diferentes soluciones extractoras que extraerán diferentes cantidades de los nutrientes en los diferentes tipos de suelos. Por sí solo, un análisis de suelo no tiene valor; es una cifra empírica que puede reflejar o no la disponibilidad de

un nutrimento para las plantas. Estas extracciones tendrán un sentido agronómico sí guardan alguna relación con la acción que hacen las raíces de las plantas en el suelo. Si no se ha comprobado, que existe una relación lineal entre la cantidad de nutriente extraído analíticamente con el desarrollo de la planta, el valor de un análisis de suelo carece de significado. Además es muy importante establecer el punto o nivel de elemento extraído con esa solución extractora a partir del cual los rendimientos que se obtienen del cultivo son casi iguales. De ahí que el diagnóstico químico de la fertilidad del suelo, para ser adecuado y confiable deba apoyarse en dos aspectos esenciales: (a) en el uso de soluciones extractoras de la fracción disponible adecuadas para los diferentes grupos de suelos, y (b) en la utilización de niveles críticos (altos, medios y bajos) confiables, calibrados para la solución extractora más adecuada según los grupos de suelos, y según los cultivos. (Ramos, 2003)

Un análisis de suelo, en la Agricultura moderna, es una actividad central de proceso de corrección de suelo, que se inicia con la retirada de una muestra de suelo, prosigue con el análisis químico y la prescripción de cantidades adecuadas de correctivos de suelo y fertilizantes y termina con la aplicación de estos insumos. (Sumner, 2000)

3. **Selección de solución extractora.** La selección de una u otra solución extractora para un elemento dado se basa en la mayor o menor relación entre la cantidad del elemento extraído por la solución y la cantidad del elemento extraído realmente por la planta. En términos prácticos, una solución extractora será eficiente o adecuada cuando a valores altos de extracción correspondan también valores altos de absorción del elemento y cuando los valores bajos de extracción coincidan con baja absorción del elemento por la planta. El caso contrario supondrá una eficiencia baja o nula. (Ramos, 2003)

a. **Solución extractora de Mehlich I:** Esta solución está compuesta de 0.05 N de ácido clorhídrico más 0.125 N de ácido sulfúrico. Esta solución fue propuesta en 1953 por Nelson et. Al. También conocida como Carolina del Norte o Mehlich I. Fue introducida a Guatemala por ISSFE. Se utiliza principalmente para extraer fósforo, aunque también es capaz de determinar el potasio, calcio y magnesio en los suelos arenosos que tienen una capacidad de intercambio menor a 10 meq/100gr. A partir de un pH superior a 6.5 con un contenido relativamente bajo de materia orgánica (menor de 5%), este método nos es recomendable porque extrae nutrientes que no están disponibles en suelos, especialmente el fósforo. Por lo tanto, este método se recomienda para suelos ácidos con baja capacidad de intercambio catiónico. (Ramos, 2003)

b. **Solución extractora de Olsen Modificado:** Esta solución está compuesta de 0.5 N de NaHCO_3 , 0.01M EDTA con 0.5 g de *Superfloc 127* para preparar 10 L de solución. Se ha observado que el fósforo extraído con NaHCO_3 generalmente es menor que el extraído con Mehlich I. También se ha reportado que la solución extractora de Olsen Modificado tiene una buena correlación con la extracción con el método de intercambio iónico. Este último método ha demostrado ser apropiado para suelos de origen volcánico, además de poder extraer macronutrientes y micronutrientes a la vez. (Ramos, 2003)

4. **Fósforo.** El fósforo del suelo proviene principalmente de la meteorización de la apatita, un mineral que contiene fósforo y calcio, así como como flúor, cloro. El fósforo elemental es químicamente

muy reactivo, por eso no está presente en un estado puro en la naturaleza. Se encuentran solamente en combinaciones químicas con otros elementos. A medida que las apatitas se descomponen y liberan fósforo, se forman compuestos de este elemento se liberan en forma de iones fosfato. (Ramos, 2003)

El fósforo total en la capa arable disminuye conforme aumenta la intensidad de la meteorización. Los suelos nuevos derivados de ceniza volcánica presentan un mayor contenido de fósforo total que los desarrollados de sedimentos meteorizados y depositado en áreas bajas tropicales. (Ramos, 2003)

Los contenidos de fósforo en suelos de áreas tropicales son muy variables. Entre las condiciones edafológicas y ecológicas del suelo, las que principalmente determinan esta variable son el tipo de roca parietal presente, el grado de desarrollo de los suelos y el contenido de materia orgánica en forma localizada, suelos ricos en fósforo total resultan de materiales parentales ricos en fósforo. Por otra parte, al aumentar el contenido de materia orgánica de los suelos, aumenta el contenido de fosfato orgánico y por lo tanto, los contenidos totales llegan a ser mayores. Factores estabilizadores de materia orgánica como órgano minerales y alófana es muy posible que conduzcan a elevar los niveles de fósforo total de los suelos. El contenido total también depende de la textura del suelo y tanto en áreas de clima templado como tropicales, entre más fina sea la textura, mayor es el contenido de fósforo total. El fósforo en el suelo lo podemos encontrar en forma de fósforo orgánico y fósforo inorgánico, dentro del fósforo inorgánico se diferencian tres fracciones. (Ramos, 2003)

a. Fósforo nativo o precipitado: Esta forma sólida de fósforo está dividida en tres fracciones activas y dos relativamente inactivas. Las activas son los fosfatos enlazados a calcio, aluminio y al hierro. Se presentan como película o están absorbidos en la superficie de arcillas o limos. Las formas inactivas son las formas oclusivas y aquellas que se disuelven con la reducción química del suelo. El fósforo oclusivo consiste en compuestos de P-Al y P-Fe rodeado de un revestimiento inerte que evita la reacción de estos fosfatos con la solución del suelo. (Ramos, 2003)

b. Fósforo absorbido al complejo coloidal: Como anión que es, el fosfato está sujeto a fenómenos de adsorción e intercambio aniónico en la superficies coloidales cargadas positivamente. Los fosfatos son los iones presentes que presentan mayor fuerza de retención y hasta son capaces de desplazar a los otros. Las cargas positivas del complejo coloidal se producen en todos aquellos puntos en donde hay OH⁻ terminales en medios ácidos que protonan los grupos OH⁻. (Ramos, 2003)

c. Fósforo soluble: Las cantidades en esta fracción son bajas (menos de 0.2 ppm). Se presentan en las dos formas aniónicas mas solubles (H₂PO₄⁻ y HPO₄⁻²) variando su predominancia según el pH. Entre el pH 2 y 7 predomina la forma H₂PO₄⁻; Y entre pH 7 y 12, la forma HPO₄⁻². Entonces la forma más común en los suelos tropicales es la H₂PO₄⁻. (Ramos, 2003)

El fósforo ha recibido considerable atención dentro de la investigación sobre métodos de análisis de suelos, a pesar de esto, todavía no se llega a un acuerdo sobre cuál sería la mejor metodología para determinar la disponibilidad de este nutriente. La utilización de la resina de intercambio iónico parece ser un excelente procedimiento, sin embargo, se le ha aceptado en forma limitada como método de análisis de rutina en los laboratorios de suelos alrededor del mundo. (Raij; Quaggio, 2009)

Cuando existen varios métodos que reportan contenidos diferentes de P en las mismas muestras de suelo es necesario determinar qué procedimiento es el mejor. Para lograr esto se conducen experimentos de invernadero que permiten establecer qué método correlaciona más estrechamente el contenido de P en el suelo con la absorción de P por la planta. Estos experimentos, conducidos en macetas, utilizan suelos que tengan un amplio rango de las características que afectan las reacciones de P. Las macetas se siembran con una planta indicadora a la cual se suministran todos los nutrientes con excepción de P. El grado de correlación entre la cantidad de P absorbido por la planta indicadora y el contenido de P en el suelo determinado por cada método permite decidir qué procedimiento predice mejor la disponibilidad de P en el suelo. (Raij; Quaggio, 2009)

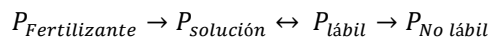
Se han conducido numerosos estudios comparando métodos de determinación de P en el suelo. Los datos de la Tabla 3 indican que el método de intercambio iónico correlaciona mejor con la absorción de P que los otros métodos. Se observó también que este método es apropiado tanto para suelos ácidos como alcalinos. El pH de la solución es importante en el procedimiento que utiliza la resina de intercambio iónico. Es importante la saturación de la resina de intercambio iónico con el ion bicarbonato porque con esto se amortigua el medio, factor que favorece la estabilidad de los resultados. (Raij; Quaggio, 2009)

Tabla 3. Efectividad de métodos de extracción de P del suelo para predecir la absorción de P por la planta

Método	Promedio del coeficiente de determinación ($100 r^2$) para suelos		
	Suelos ácidos	Suelos alcalinos	Suelos no especificados
Intercambio iónico	84	83	69
Olsen Modificado	47	52	58
Mehlich I	56	39	41
Bray I	53	25	48
Morgan	26	40	32

Un método apropiado de análisis de fósforo debe captar el P que está presente en la solución de suelo en condiciones de campo (cantidades muy bajas) y extraer el P presente en las formas lábiles (disponibles través del tiempo) del suelo. Sin embargo, no debe extraer el P que no es lábil (fijado y precipitado en formas insolubles) y el P que se encuentra en los fertilizantes aplicados que no se han disuelto. La extracción de P con la resina de intercambio iónico se realiza en una suspensión de agua y esta condición simula mejor que otros métodos la absorción de P por las raíces de las plantas. (Raij; Quaggio, 2009)

La resina actúa como un sitio de atracción de los iones que se encuentran en el agua de la suspensión. Los iones fosfato cargados negativamente (principalmente $H_2PO_4^{-1}$) son atraídos por las cargas positivas de la resina de intercambio iónico, promoviendo de esta forma la disolución de P lábil de la fase sólida del suelo.



Ecuación 15 (Raij; Quaggio, 2009)

Las raíces de las plantas absorben P de la solución de suelo. El movimiento del P a través de la solución del suelo hacia las raíces crea un gradiente de concentración que promueve la disolución del P lábil de la fase sólida y el flujo continuo de P hacia las raíces por difusión. De igual forma, con el método de resina, el poco P que está inicialmente presente en la solución es atraído por un material poroso sintético con cargas positivas (resina) simulando la acción de las raíces. Esta condición crea el gradiente de concentración que extrae el P de las formas lábiles. En el laboratorio, el proceso se acelera mediante 16 horas continuas de agitación de la suspensión de suelo con resinas de intercambio. (Raij; Quaggio, 2009)

Un análisis de laboratorio debe extraer el P de la solución y el P lábil del suelo, pero no debe remover los fosfatos de lenta liberación si estos no contribuyen con P que la planta pueda absorber. El método tampoco debe extraer P en las formas no lábiles. En la práctica, el problema de la mayoría de extractantes para P es que éstos determinan formas químicas específicas de P y no necesariamente el P biodisponible. Los extractantes ácidos como Mehlich I, disuelven preferentemente los fosfatos de calcio y los extractantes que contienen fluoruro, como Bray I, actúan específicamente sobre los fosfatos de aluminio. (Raij; Quaggio, 2009)

VI. METODOLOGÍA

A. Selección de los puntos de muestreo

Para la selección de los puntos se tomó de base la extensión geográfica y la representatividad de cada punto de muestreo en relación al total de cada región cafetalera. En total se muestrearon las siete regiones cafetaleras delimitadas por Anacafé. El número de muestras en cada región fue la siguiente.

Tabla 4. Descripción de las regiones y número de muestras correspondiente

Región	Departamentos	Número muestras
I	San Marcos, Quetzaltenango,	25
II	Mazatenango, Suchitepéquez, Retalhuleu, Sololá	20
III	Sacatepéquez, Chimaltenango, Escuintla, Guatemala	13
IV	Santa Rosa, Jalapa, Jutiapa	16
V	Huehuetenango, Quiché	34
VI	Alta Verapaz, Baja Verapaz, Izabal	19
VII	Zacapa, Chiquimula	23
Total		150

B. Muestreo

El muestreo fue realizado de acuerdo al protocolo desarrollado por Anacafé para la toma de muestras de suelo con fines de fertilidad. Este método consiste en recolectar de 15 a 20 sub-muestras en forma aleatoria, dentro de un área representativa de un cafetal, para formar una muestra compuesta; la profundidad de muestreo fue de 0 a 20 cm. Las muestras compuestas fueron ingresadas al laboratorio donde fueron procesadas para su respectivo análisis. Este procesamiento consiste en el secado, tamizado y homogenizado.

C. Preparación de las muestras de suelo

1. **Secado:** El suelo fue secado sobre bandejas plásticas adyacente a un deshumidificador. Fue removida periódicamente de 3 a 4 veces por día hasta lograr un secado homogéneo.
2. **Tamizado:** Se utilizó un tamiz No. 10 con un diámetro de 2 mm hasta pasar todo el suelo, obteniéndose aproximadamente 500 g de suelo tamizado para cada muestra.
3. **Homogenizado:** La muestra ya tamizada se homogenizó por agitación y se procedió a guardar en cajas de cartón, etiquetadas según registros del laboratorio y almacenada en una bodega seca.

D. Determinaciones químicas de las muestras de suelo

Se utilizó una fracción de la muestra compuesta de los suelos previamente homogeneizados para la determinación de sus características químicas de acuerdo a las metodologías que se presentan en el siguiente cuadro.

Tabla 5. Características químicas determinadas y metodologías utilizadas para el análisis

Característica química	Metodología
Materia orgánica	Combustión Húmeda de Walkley y Black
Nivel de pH	Potenciómetro con agua en relación 1:10
Fósforo y potasio	Método de Olsen Modificado
Calcio y magnesio	Extracción con cloruro de potasio (KCl 1M)
Aluminio y acidez intercambiable	Extracción con cloruro de potasio (KCl 1M) y retro-valoración con NaOH 0.05 M
Microelementos (Fe, Cu, Mn y Zn)	Determinación solución DTPA

Fuente: Métodos analíticos de ANALAB, Anacafé

E. Descripción de los métodos evaluados

Tabla 6. Descripción de metodologías utilizadas para análisis de muestras

Método	Analito	Reactivos	Procedimiento
Olsen Modificado	Fósforo y potasio	0.5 N NaHCO ₃ 0.01 M EDTA	<ul style="list-style-type: none"> - Colocar 2.5 mL de suelo con 25 mL de solución extractora en un vaso de precipitado. - Agitar a velocidad lenta (400 rpm) por 10 minutos. - Filtrar con papel filtro poroso (Whatman No. 1) - Cuantificar el fósforo por porcentaje de absorbancia en un espectrofotómetro a 680 nm longitud de onda. - Tomar una alícuota de 2 mL del filtrado y mezclar con 18 mL de agua destilada. - Determinar potasio con un espectrofotómetro de absorción atómica.
Mehlich I	Fósforo y potasio	.005 N HCl 0.025 N H ₂ SO ₄	<ul style="list-style-type: none"> - Colocar 5 mL de suelo y 25 mL de solución extractora en vaso de precipitado. - Agitar a velocidad lenta (400 rpm) por cinco minutos. - Filtrar con papel filtro Whatman No. 1 o No. 2 - Cuantificar el fósforo por porcentaje de absorbancia en un espectrofotómetro a 680 nm longitud de onda. - Tomar una alícuota de 2 mL del filtrado y mezclar con 18 mL de agua destilada. - Determinar potasio con un espectrofotómetro de absorción atómica.

Tabla 7. Descripción de metodologías utilizadas para análisis de muestras

Método	Analito	Reactivos	Procedimiento de extracción y análisis
Resinas Intercambiadores de iones	Fósforo, potasio, calcio y magnesio	Resina intercambiadora de aniones tipo base fuerte. Amberlite IRA-400 Resina intercambiadora de cationes tipo ácido fuerte. Amberlite IR-400 0.8 M NH ₄ Cl + 0.2 M HCl 1.0 M NaHCO ₃	<ul style="list-style-type: none"> - Colocar 2.5 mL de suelo en vaso de precipitado con 25 mL de agua destilada y una bola de vidrio. - Agitar por 15 minutos para disgregar el suelo. - Retirar bola de vidrio y agregar 2.5 mL de resina tratada. - Agitar a una velocidad de 220 rpm por 16 horas. - Tamizar suspensión en malla de poliéster de 0.4 mm y lavar resina con agua. - Transferir toda la resina a vaso plástico y agregar 50 mL de solución extractora. - Dejar en reposo 30 minutos. - Filtrar con papel filtro Whatman No. 1 o No. 2 - Cuantificar potasio, calcio y magnesio por espectrofotometría de absorción atómica. - Cuantificar el fósforo por porcentaje de absorbancia en un espectrofotómetro a 720 nm de longitud de onda.
Extracción por solución KCl 1M	Calcio y magnesio	1 N KCl	<ul style="list-style-type: none"> - Colocar 2.5 mL de suelo con 25 mL de solución extractora en un vaso de precipitado. - Agitar por 10 minutos a velocidad de 400 rpm. - Filtrar con papel filtro Whatman No. 1, No. 2 o similar. - Cuantificar calcio y magnesio con un espectrofotómetro de absorción atómica.

F. Análisis de la información

Los resultados obtenidos fueron recopilados en una hoja de cálculo, agrupados en las diferentes regiones. Con ellos se elaboraron gráficas de barras y fueron sometidos al análisis de regresión lineal para obtener una correlación entre los diferentes métodos.

Para la elaboración del informe final, así como la interpretación de resultados, se hizo consultas bibliográficas, páginas de internet con contenido científico, tesis previas de grado académico, revistas, artículos científicos, etc. Y con los resultados de fósforo obtenidos se realizó un mapa utilizando un Programa de Información Geográfica, por ser éste el nutriente que causa mayor variabilidad entre los métodos evaluados.

VII. RESULTADOS

A. Fósforo

En la Tabla 8 se muestran los resultados mínimos, máximos y promedios de la determinación de fósforo para todas las regiones analizadas, según los tres métodos evaluados. Se incluye también la desviación estándar.

Tabla 8. Resultados de la determinación de fósforo para cada región analizada según los tres métodos evaluados

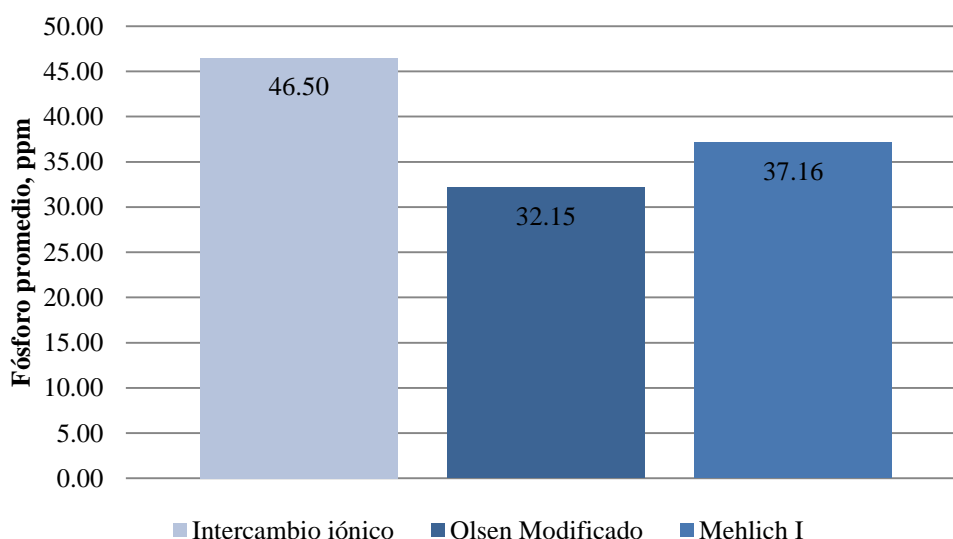
Región	Parámetro	Intercambio iónico, ppm	Olsen Modificado, ppm	Mehlich I, ppm
I	Mínimo	5.53	4.00	1.31
	Máximo	126.13	32.85	197.45
	Promedio	32.32	13.85	32.44
	Desviación estándar	29.74	7.93	46.34
II	Mínimo	2.80	1.41	0.09
	Máximo	199.91	102.90	366.37
	Promedio	33.03	16.48	27.30
	Desviación estándar	43.43	23.17	81.16
III	Mínimo	11.65	9.09	0.60
	Máximo	153.54	122.29	113.44
	Promedio	53.54	38.02	32.81
	Desviación estándar	46.71	36.84	43.59
IV	Mínimo	6.99	5.17	0.49
	Máximo	271.99	157.83	284.52
	Promedio	53.85	39.93	40.50
	Desviación estándar	70.26	49.28	73.85
V	Mínimo	5.21	5.10	0.01
	Máximo	269.70	303.40	356.47
	Promedio	91.54	70.81	80.53
	Desviación estándar	84.55	77.04	106.48
VI	Mínimo	1.83	1.59	0.04
	Máximo	37.96	87.15	71.84
	Promedio	12.17	11.70	6.28
	Desviación estándar	8.01	19.12	16.12
VII	Mínimo	2.88	1.95	0.01
	Máximo	71.06	67.09	74.94
	Promedio	26.33	16.65	12.37
	Desviación estándar	20.07	16.55	18.16

En la Tabla 9, se muestran los resultados del total de muestras analizadas para el análisis de fósforo según los tres métodos evaluados. En la Figura 7 se muestra una gráfica de barras que ilustra la información de la tabla.

Tabla 9. Resumen de la extracción de fósforo para todas las muestras según los tres métodos evaluados

Método	Mínimo, ppm	Máximo, ppm	Promedio, ppm	Desviación estándar
Intercambio iónico	1.83	271.99	46.50	58.74
Olsen Modificado	1.41	303.40	32.15	48.60
Mehlich I	0.01	366.37	37.16	71.73

Figura 7. Extracción promedio de fósforo por diferentes métodos



En la Tabla 10 se encuentran las ecuaciones de correlación entre los diferentes métodos para el análisis de fósforo en cada una de las regiones. Tanto la variable dependiente como la independiente se indican entre paréntesis en el encabezado de la tabla.

Tabla 10. Ecuaciones lineales de regresión para análisis de fósforo (P) por diferentes métodos analíticos

Región	Intercambio Iónico (Y) Vs. Olsen Modificado (X)	Intercambio Iónico (Y) Vs. Mehlich I (X)	Mehlich I (Y) Vs. Olsen Modificado (X)
I	$y = 0.9006x + 19.846$	$y = 0.3771x + 20.081$	$y = 3.324x - 13.58$
II	$y = 1.7985x + 3.3901$	$y = 0.4996x + 19.391$	$y = 3.2975x - 27.047$
III	$y = 1.1369x + 10.315$	$y = 1.0513x + 19.054$	$y = 1.1138x - 9.5413$
IV	$y = 1.3566x - 0.3181$	$y = 0.9304x + 16.169$	$y = 1.3698x - 14.196$
V	$y = 0.6802x + 43.372$	$y = 0.4723x + 53.505$	$y = 1.3001x - 11.533$
VI	$y = 0.329x + 8.3208$	$y = 0.3902x + 9.7207$	$y = 0.8266x - 3.3934$
VII	$y = 1.1065x + 7.901$	$y = 0.9731x + 14.294$	$y = 1.0093x - 4.4428$

Finalmente, en la Tabla 11 se muestran los coeficientes de correlación para las ecuaciones de la Tabla 10. Tanto la variable dependiente como la independiente se indican entre paréntesis en el encabezado de la tabla.

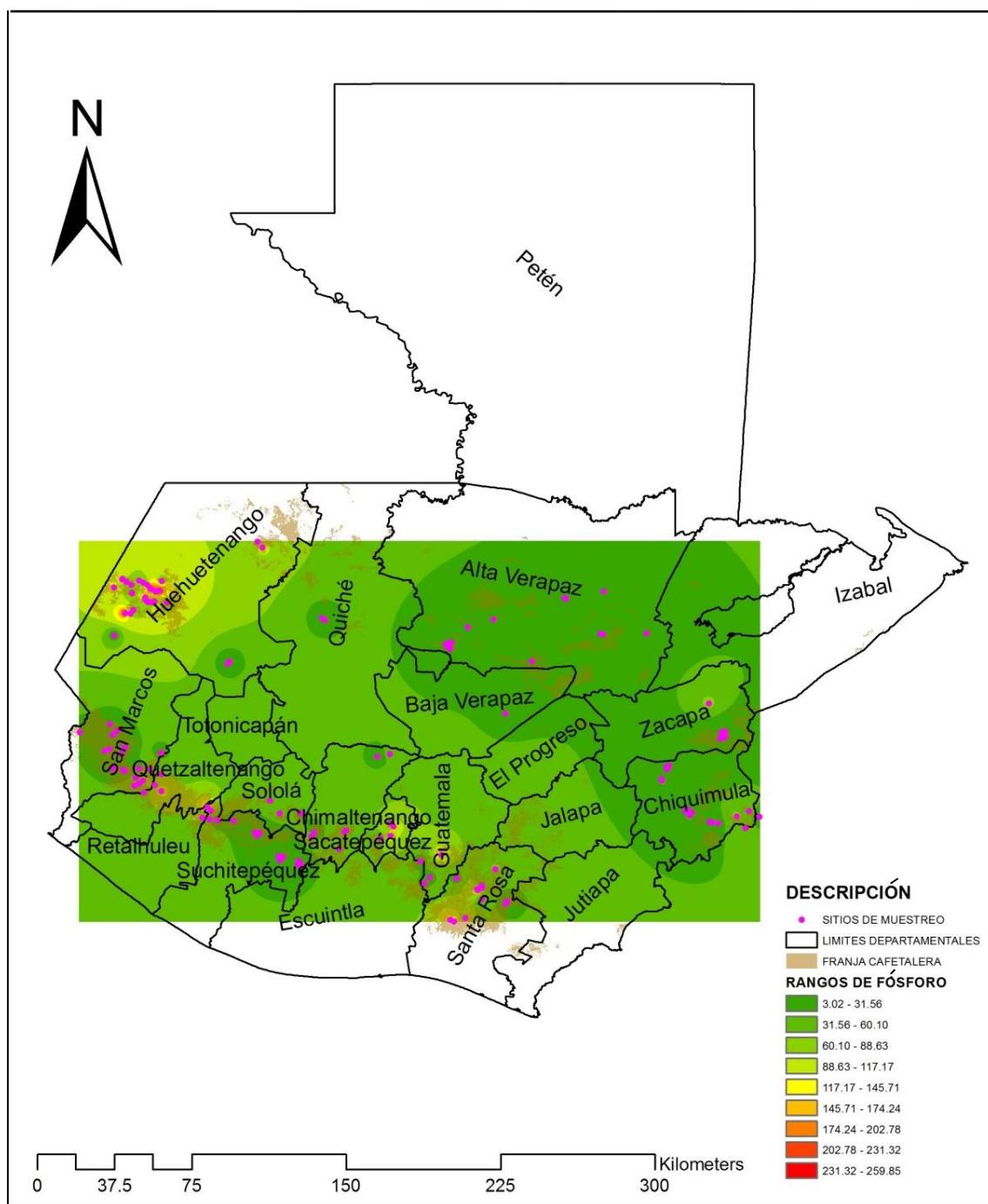
Tabla 11. Coeficientes de correlación lineal entre diferentes metodologías para el análisis de fósforo (P)

Región	Intercambio Iónico (Y) Vs. Olsen Modificado (X)	Intercambio Iónico (Y) Vs. Mehlich I (X)	Mehlich I (Y) Vs. Olsen Modificado (X)
I	0.0576	0.3452	0.3234
II	0.9203	0.8717	0.8859
III	0.8038	0.9624	0.8858
IV	0.9054	0.9565	0.8354
V	0.3841	0.3538	0.8848
VI	0.6166	0.6163	0.9615
VII	0.8328	0.7749	0.8468

Los mapas elaborados a partir de los resultados de fósforo se encuentran en la página siguiente. La Figura 8 muestra el mapa general de distribución del total de los datos y la Figura 9 muestra un acercamiento en el departamento de Huehuetenango, donde se observa una mayor concentración de niveles altos de fósforo.

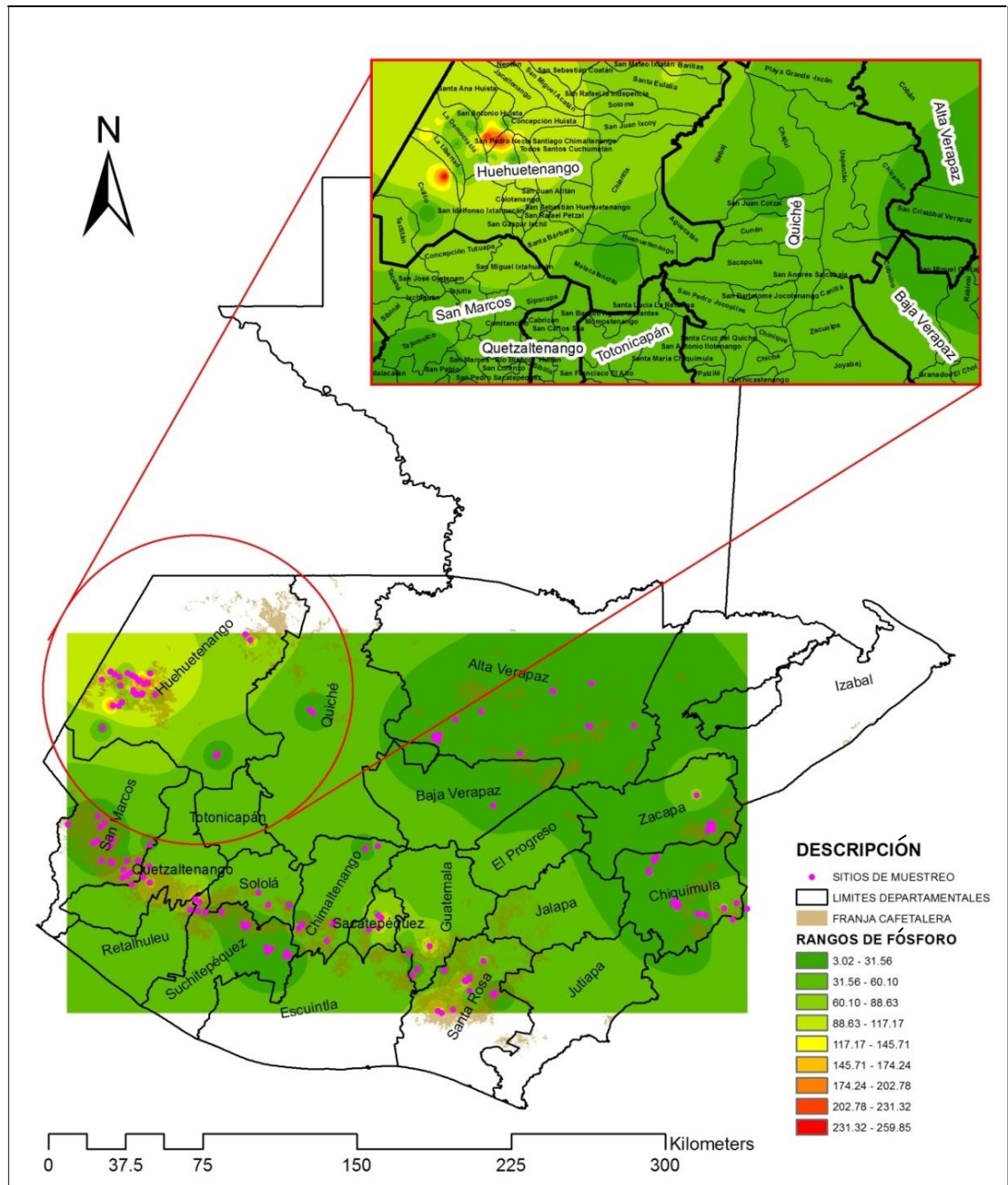
En el capítulo Anexos, en la página 117, se encuentran todas las gráficas de comparación obtenidas a partir de los resultados de fósforo para cada región.

Figura 8. Mapa de niveles de fósforo en regiones cafetaleras determinadas a partir del método de intercambio iónico*



*Este mapa tiene únicamente fines de mejor visualización de los resultados; no pretende poder ser utilizado como mapa de fertilización. Este mapa se interpreta en el capítulo de Resultados, página 46.

Figura 9. Mapa de niveles de fósforo en regiones cafetaleras determinadas a partir del método de intercambio iónico, con acercamiento en Huehuetenango*



*Este mapa tiene únicamente fines de mejor visualización de los resultados; no pretende poder ser utilizado como mapa de fertilización. Este mapa se interpreta en el capítulo de Resultados, página 46.

B. Potasio

En la Tabla 12 se muestran los resultados mínimos, máximos y promedios de la determinación de potasio para todas las regiones analizadas, según los tres métodos evaluados. Se incluye también la desviación estándar.

Tabla 12. Resultados de la determinación de potasio para cada región analizada según los tres métodos evaluados

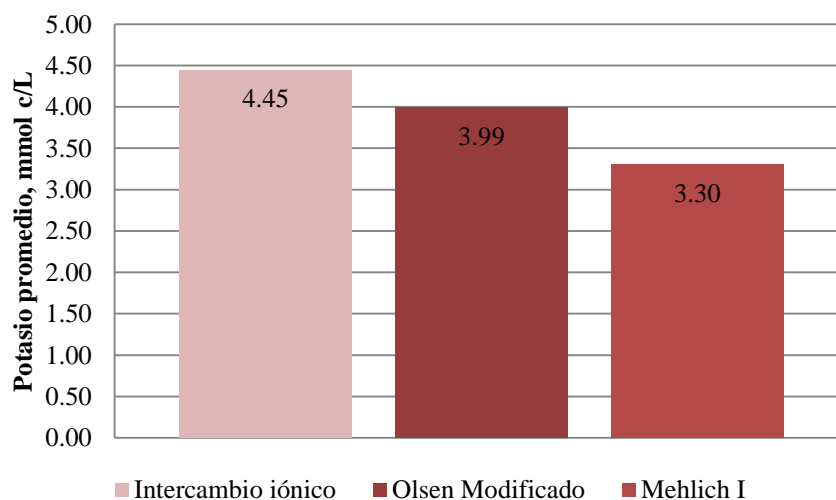
Región	Parámetro	Intercambio iónico, mmol c/L	Olsen Modificado, mmol c/L	Mehlich I, mmol c/L
I	Mínimo	1.24	1.00	0.48
	Máximo	7.20	6.80	4.76
	Promedio	3.16	2.32	1.73
	Desviación estándar	1.62	1.55	1.08
II	Mínimo	0.51	1.00	0.22
	Máximo	9.22	9.38	7.06
	Promedio	4.37	3.50	3.52
	Desviación estándar	2.66	2.37	2.35
III	Mínimo	1.08	1.00	0.59
	Máximo	9.20	11.60	8.91
	Promedio	5.14	5.92	4.52
	Desviación estándar	2.39	3.03	2.43
IV	Mínimo	1.40	1.30	0.90
	Máximo	11.04	8.80	8.38
	Promedio	5.08	4.60	4.13
	Desviación estándar	2.35	1.95	1.77
V	Mínimo	1.63	1.10	1.05
	Máximo	24.92	21.20	21.79
	Promedio	6.70	6.04	5.29
	Desviación estándar	5.45	5.09	5.00
VI	Mínimo	0.10	1.00	0.42
	Máximo	4.59	4.00	2.51
	Promedio	2.02	1.83	1.37
	Desviación estándar	1.20	0.97	0.72
VII	Mínimo	1.13	1.00	0.53
	Máximo	10.20	9.00	5.39
	Promedio	3.76	3.46	2.22
	Desviación estándar	2.47	2.45	1.42

A continuación, en la Tabla 13 se muestran los resultados del total de muestras analizadas para el análisis de K según los tres métodos evaluados. En la Figura 10 se muestra una gráfica de barras que ilustra la información.

Tabla 13. Resumen de la extracción de potasio para todas las muestras según los tres métodos evaluados

Método	Mínimo, mmol c/L	Máximo, mmol c/L	Promedio, mmol c/L	Desviación estándar
Intercambio iónico	0.10	24.92	4.45	3.51
Olsen Modificado	1.00	21.20	3.99	3.38
Mehlich I	0.22	21.79	3.30	3.13

Figura 10. Extracción promedio de potasio por diferentes métodos



En la Tabla 14 se encuentran las ecuaciones de correlación entre los diferentes métodos para el análisis de potasio en cada una de las regiones. Tanto la variable dependiente como la independiente se indican entre paréntesis en el encabezado de la tabla.

Tabla 14. Ecuaciones lineales de regresión para análisis de potasio (K) por diferentes métodos analíticos

Región	Intercambio Iónico (Y) Vs. Olsen Modificado (X)	Intercambio Iónico (Y) Vs. Mehlich I (X)	Mehlich I (Y) Vs. Olsen Modificado (X)
I	$y = 0.9971x + 0.842$	$y = 1.4705x + 0.6133$	$y = 0.6471x + 0.2274$
II	$y = 1.0664x + 0.6426$	$y = 0.4996x + 19.391$	$y = 0.9406x + 0.2308$
III	$y = 0.7669x + 0.6069$	$y = 1.0513x + 19.054$	$y = 0.7663x - 0.0131$
IV	$y = 1.1517x - 0.2168$	$y = 0.9304x + 16.169$	$y = 0.8805x + 0.082$
V	$y = 1.0262x + 0.4996$	$y = 1.0632x + 1.0739$	$y = 0.967x - 0.5508$
VI	$y = 0.7944x + 0.5737$	$y = 1.1842x + 0.3986$	$y = 0.6622x + 0.1638$
VII	$y = 0.9635x + 0.4214$	$y = 1.6643x + 0.0624$	$y = 0.5603x + 0.28$

Finalmente, en la Tabla 15 se muestran los coeficientes de correlación para las ecuaciones de la Tabla 14. Tanto la variable dependiente como la independiente se indican entre paréntesis los encabezados.

Tabla 15. Coeficientes de correlación lineal entre diferentes metodologías para el análisis de potasio (K)

Región	Intercambio Iónico (Y) Vs. Olsen Modificado (X)	Intercambio Iónico (Y) Vs. Mehlich I (X)	Mehlich I (Y) Vs. Olsen Modificado (X)
I	0.9095	0.9488	0.8728
II	0.902	0.8717	0.8932
III	0.9471	0.9624	0.9087
IV	0.9112	0.9565	0.9435
V	0.9207	0.9542	0.9685
VI	0.411	0.5051	0.7927
VII	0.9148	0.909	0.9427

En el capítulo Anexos, en la página 126, se encuentran todas las gráficas de comparación obtenidas a partir de los resultados de potasio para cada región.

C. Calcio

En la Tabla 16 se muestran los resultados del total de muestras analizadas para el análisis de calcio según los dos métodos evaluados. Y en la Figura 11 se muestra una gráfica de barras ilustrativa. Luego en la Tabla 17 se muestran los resultados mínimos, máximos y promedios de la determinación de calcio para todas las regiones analizadas, según los dos métodos evaluados. Se incluye también la desviación estándar.

Tabla 16. Resumen de la extracción de calcio para todas las muestras según los dos métodos evaluados

Método	Mínimo, mmol c/L	Máximo, mmol c/L	Promedio, mmol c/L	Desviación estándar
Intercambio iónico	2.23	354.25	38.97	44.73
Cloruro de potasio	0.50	342.00	47.57	47.32

Figura 11. Extracción promedio de calcio por diferentes métodos

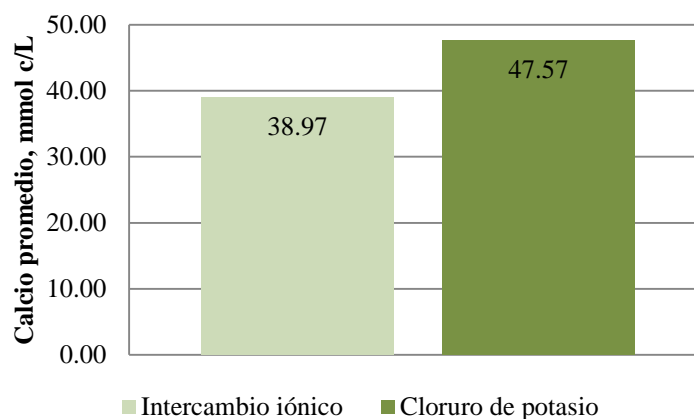


Tabla 17. Resultados de la determinación de calcio para cada región analizada según los dos métodos evaluados

Región	Parámetro	Intercambio iónico, mmol c/L	Cloruro de potasio, mmol c/L
I	Mínimo	2.99	1.00
	Máximo	30.01	42.50
	Promedio	14.02	16.00
	Desviación estándar	7.98	11.42
II	Mínimo	2.23	1.00
	Máximo	46.05	60.00
	Promedio	22.89	20.52
	Desviación estándar	11.98	18.16
III	Mínimo	19.33	9.80
	Máximo	87.43	108.50
	Promedio	42.15	58.85
	Desviación estándar	16.35	24.21
IV	Mínimo	17.90	29.80
	Máximo	354.25	342.00
	Promedio	67.73	94.38
	Desviación estándar	80.44	80.95
V	Mínimo	5.50	3.50
	Máximo	213.60	202.10
	Promedio	64.44	66.79
	Desviación estándar	54.43	49.91
VI	Mínimo	3.36	0.50
	Máximo	40.06	65.50
	Promedio	22.59	34.23
	Desviación estándar	11.56	22.85
VII	Mínimo	2.71	1.00
	Máximo	165.50	144.20
	Promedio	34.13	49.09
	Desviación estándar	37.90	39.95

En la Tabla 18 se encuentran las ecuaciones de correlación entre los diferentes métodos para el análisis de calcio en cada una de las regiones. Tanto la variable dependiente como la independiente se indican entre paréntesis en el encabezado de la tabla.

Tabla 18. Ecuaciones lineales de regresión para análisis de calcio (Ca) por diferentes métodos analíticos

Región	Intercambio Iónico (Y) Vs. Cloruro de Potasio (X)
I	$y = 0.4891x + 6.1922$
II	$y = 0.6039x + 10.499$
III	$y = 0.6127x + 6.0965$
IV	$y = 0.9227x - 19.36$
V	$y = 0.9681x - 0.2211$
VI	$y = 0.4699x + 6.508$
VII	$y = 0.772x - 3.77$

Finalmente, en la Tabla 19 se muestran los coeficientes de correlación para las ecuaciones de la Tabla 18. Tanto la variable dependiente como la independiente se indican entre paréntesis en los encabezados.

Tabla 19. Coeficientes de correlación lineal entre diferentes metodologías para el análisis de calcio (Ca)

Región	Intercambio Iónico (Y) Vs. Cloruro de Potasio (X)
I	0.4893
II	0.8376
III	0.8229
IV	0.8621
V	0.788
VI	0.8635
VII	0.6621

En el capítulo Anexos, en la página 135, se encuentran todas las gráficas de comparación obtenidas a partir de los resultados de calcio para cada región.

D. Magnesio

En la Tabla 20 se muestran los resultados mínimos, máximos y promedios de la determinación de magnesio para todas las regiones analizadas, según los dos métodos evaluados. Se incluye también la desviación estándar.

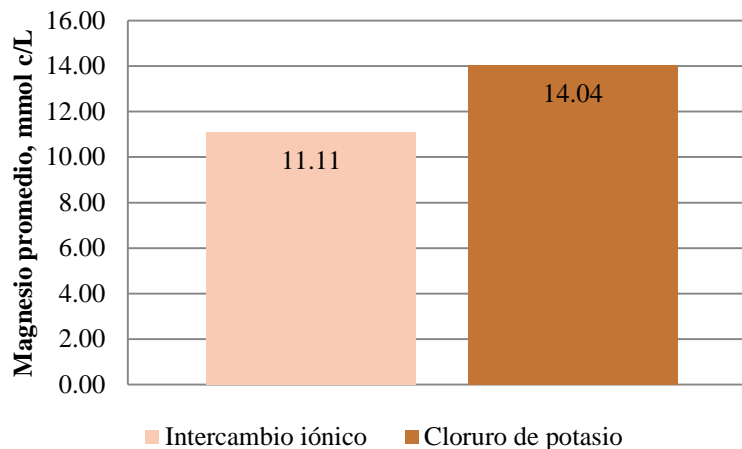
Tabla 20. Resultados de la determinación de magnesio para cada región analizada según los dos métodos evaluados

Región	Parámetro	Intercambio iónico, mmol c/L	Cloruro de potasio, mmol c/L
I	Mínimo	1.88	1.00
	Máximo	8.41	9.10
	Promedio	4.54	3.58
	Desviación estándar	7.98	2.37
II	Mínimo	1.71	1.00
	Máximo	13.63	12.20
	Promedio	5.86	4.97
	Desviación estándar	11.98	3.68
III	Mínimo	4.24	1.20
	Máximo	21.38	26.40
	Promedio	11.78	14.88
	Desviación estándar	16.35	7.81
IV	Mínimo	6.85	7.40
	Máximo	55.30	130.40
	Promedio	17.57	26.90
	Desviación estándar	80.44	30.63
V	Mínimo	3.16	2.10
	Máximo	57.52	70.00
	Promedio	18.94	20.49
	Desviación estándar	54.43	15.27
VI	Mínimo	2.30	1.20
	Máximo	14.72	31.60
	Promedio	9.03	13.59
	Desviación estándar	11.56	8.87
VII	Mínimo	0.66	1.00
	Máximo	28.60	39.80
	Promedio	8.08	14.72
	Desviación estándar	37.90	11.67

En la Tabla 21 se muestran los resultados del total de muestras analizadas para el análisis de magnesio según los dos métodos evaluados. En la Figura 12 se muestra una gráfica de barras que ilustra la información de la tabla.

Tabla 21. Resumen de la extracción de magnesio para todas las muestras según los dos métodos evaluados

Método	Mínimo, mmol c/L	Máximo, mmol c/L	Promedio, mmol c/L	Desviación estándar
Intercambio iónico	0.66	57.52	11.11	10.05
Cloruro de potasio	1.00	130.40	14.04	15.49

Figura 12. Extracción promedio de magnesio por diferentes métodos

En la Tabla 22 se encuentran las ecuaciones de correlación entre los diferentes métodos para el análisis de magnesio en cada una de las regiones. Tanto la variable dependiente como la independiente se indican entre paréntesis en el encabezado de la tabla.

Tabla 22. Ecuaciones lineales de regresión para análisis de magnesio (Mg) por diferentes métodos analíticos

Región	Intercambio Iónico (Y) Vs. Cloruro de Potasio (X)
I	$y = 0.6924x + 2.0617$
II	$y = 0.7822x + 1.9721$
III	$y = 0.619x + 2.5668$
IV	$y = 0.3889x + 7.1059$
V	$y = 0.8448x + 1.6271$
VI	$y = 0.4141x + 3.3996$
VII	$y = 0.3469x + 2.9753$

Tabla 23. Coeficientes de correlación lineal entre diferentes metodologías para análisis de magnesio (Mg)

Región	Intercambio Iónico (Y) Vs. Cloruro de Potasio (X)
I	0.7528
II	0.7813
III	0.909
IV	0.9161
V	0.84
VI	0.8092
VII	0.5762

Finalmente, en la Tabla 23 se muestran los coeficientes de correlación para las ecuaciones de la Tabla 22. Tanto la variable dependiente como la independiente se indican entre paréntesis en los encabezados.

En el capítulo Anexos, en la página 140, se encuentran todas las gráficas de comparación obtenidas a partir de los resultados de fósforo para cada región.

VIII. DISCUSIÓN

El objetivo principal de esta investigación fue contribuir al desarrollo y adecuación de la metodología de extracción de iones de suelo (P, K, Ca y Mg) por resinas de intercambio para el diagnóstico de la fertilidad en suelos cafetaleros en Guatemala. También fue un objetivo el comparar los resultados obtenidos con éste método y la metodología actualmente utilizada Olsen Modificado, así como, con la metodología Mehlich I que es una de las más utilizadas en los laboratorios agrícolas para el diagnóstico de la fertilidad del suelo. Esta investigación también tuvo como objetivo establecer el comportamiento de los resultados en las áreas cafetaleras según la regionalización utilizada por ANACAFE. Con los resultados de fósforo obtenido con la metodología de resinas de intercambio iónico, se elaboró un mapa donde se pretende mostrar las áreas con alto, medio y bajo contenido de fósforo. Todos estos objetivos se cumplieron satisfactoriamente y se verifican con los resultados obtenidos en el capítulo anterior. El capítulo de Resultados que inicia en la página 34 se divide en cuatro bloques principales que corresponden a los resultados de cada elemento (P, K, Ca y Mg), en orden de relevancia e interés, al momento de efectuar los análisis de fertilidad de suelos. A continuación una discusión sobre los resultados obtenidos y su relación con la teoría investigada previamente. Se discute según el orden presentado de las tablas y figuras para mayor conveniencia.

En la Tabla 8 página 34, se muestran los valores mínimos y máximos, los promedios y las desviaciones estándar de fósforo por región y método evaluado. Analizando primero los puntos máximos de fósforo para cada método, se observa que existen diferencias marcadas entre los diferentes métodos. Por ejemplo, para la región I, el valor máximo obtenido por intercambio iónico fue 126.13 ppm, con el método de Olsen fue 32.85 ppm y con el método de Mehlich I fue 197.45 ppm. Todos estos extremos corresponden a muestras con un alto contenido de fósforo. Idealmente, se pensaría que estos valores extremos corresponden a la misma muestra con el mayor contenido de fósforo del grupo. Sin embargo, entre los diferentes métodos evaluados no se identificó que la muestra con mayor cantidad de fósforo extraído por un método, corresponde a la misma muestra con mayor fósforo extraído por otro método. Por ejemplo, el mayor contenido de fósforo por intercambio iónico se encontró en la muestra 14 de la Región IV, mientras que con Olsen modificado fue la muestra 7 de la Región V, y con Mehlich I, el mayor valor se obtuvo en la muestra 7 de la Región II. Estas muestras, aun no siendo las mismas, se identificaron como muestras con valores máximos de fósforo a través de diferentes métodos. Estos máximos se muestran mejor en la Tabla 9 página 35, donde se muestra un resumen de cada metodología.

Analizando más detenidamente los resultados bajo la perspectiva de los valores máximos de cada región (Ver Tabla 8 página 34), tampoco se observa una tendencia de valores máximos exclusivos para una sola metodología. Es decir, los valores máximos de fósforo de cada región no dependen del método empleado. Por ejemplo, se observa que para las regiones I y II, el valor máximo de concentración de fósforo se extrajo con la metodología de Mehlich I (197.45 y 366.37 ppm respectivamente), mientras que en la región VI, el

máximo valor fue extraído por el método de Olsen Modificado (87.15 ppm). Y en la región III, el método de intercambio iónico presentó el mayor valor de extracción de fósforo (153.54 ppm).

El hecho que los valores máximos no corresponden a una misma muestra y que los mismos valores máximos son muy diferentes entre las metodologías pone en evidencia que, a altas concentraciones de fósforo, es difícil intentar generalizar la extracción con un solo método debido a las diferencias entre las muestras evaluadas. Bajo este análisis de valores máximos, no se puede determinar realmente cuál método es más efectivo o exacto para la extracción de fósforo a altas concentraciones. Las diferentes propiedades del suelo como pH, origen geológico, tipo de arcillas y la interacción con otros iones para formar complejos –como el fósforo que interactúa con calcio, hierro y aluminio-, provoca que los suelos tengan un comportamiento diferente ante los distintos métodos.

Fue observado que el valor máximo de extracción por resina de intercambio fue 271.99 ppm, mientras que para Mehlich I fue 366.37 ppm. Esta es una diferencia de casi 100 ppm, la cual es una diferencia muy considerable en cualquier análisis de fósforo en suelos. Esto podría ser explicado, ante la posibilidad de que las resinas intercambiadoras presentaran un límite de saturación que no les permitiera adsorber todo el fósforo presente en la muestra, pero por otro, es posible que el pH al cual actúa la solución de Mehlich I, le permita extraer mayor cantidad de fósforo que no necesariamente estaría disponible para la planta. De cualquier manera, se necesitaría hacer un análisis posterior para determinar el límite máximo de adsorción de las resinas, y con ello determinar el límite de operación permitido para obtener resultados confiables por el método de intercambio iónico

Una situación diferente se observa –y empieza a adquirir mayor claridad– cuando se analizan los límites mínimos de cada rango de fósforo para cada región. Evidentemente, el método de Mehlich I obtuvo todos los valores mínimos de todas las regiones y se observa una tendencia marcada. De hecho en la región III, se observa la mayor diferencia entre los límites mínimos para el método de Mehlich y el método de intercambio iónico. Es decir, mientras las resinas extrajeron un mínimo de 11.65 ppm de fósforo, el método de Mehlich extrajo apenas 0.01 ppm. Esta es una diferencia de más de 10 ppm, la cual es significativa en cualquier análisis de fósforo en suelos.

Esto lleva a pensar que el método de Mehlich no es efectivo para bajas concentraciones de fósforo en la mayoría de las muestras. Y se explica mejor en función de la tendencia de los iones fosfato para formar complejos con el hierro y aluminio a bajos niveles de pH. Dado que la solución extractora de Mehlich contiene ácidos débiles diluidos, el pH del medio de extracción disminuye, propiciando así la formación de complejos y evitando que el fósforo se pueda extraer adecuadamente. Por esto, todos los límites mínimos con el método de Mehlich I son muy cercanos a cero porque la detección fue casi nula. Sin embargo, la formación de complejos tendría un límite cuando las condiciones ya no son adecuadas. Entonces el fósforo subsiste como un anión fosfato (PO_4^{-3}) en la solución que puede ser extraído fácilmente y detectable por el método de Mehlich I. En conclusión, este método no parece ser efectivo para la extracción de concentraciones bajas de fósforo en el suelo.

Sin embargo, los valores mínimos o máximos de extracción no son tan relevantes estadísticamente en comparación con la media aritmética para cada región. El promedio revela información más significativa porque involucra todos los datos evaluados para cada región. El análisis bajo este parámetro se vuelve aún más claro. De hecho, se observa un evidente poder extractivo que es mayor para el método de intercambio iónico en comparación con los demás. En la Región III se observa más notablemente esta diferencia: para el intercambio iónico el promedio se calculó en 53.54 ppm, mientras que el método de Olsen fue 38.02 ppm y Mehlich I fue 32.81 ppm.

Ésta es una tendencia esperada dado que se conoce de la teoría que el método de intercambio iónico no se ve afectado por el pH del suelo. En contraste con el método de Olsen, que ha demostrado no ser muy efectivo para suelos con pH ácido. Y por su parte, el método de Mehlich I ha demostrado no ser efectivo para suelos con pH alcalino. El método de intercambio iónico, en cambio, es independiente de estas condiciones y extrae de igual forma a diferentes niveles de pH. Esta característica favorece a la credibilidad de los datos obtenidos con este método y lo convierte en un método más aplicable y confiable para el análisis de diferentes tipos de suelo. En Guatemala, la acidez del suelo mantiene un amplio rango de valores de pH, aunque con tendencia a la acidez en los suelos cafetaleros, lo cual exige contar con un método capaz de analizar el fósforo sin limitaciones de niveles de pH.

Nótese también que el método de intercambio iónico resultó ser más efectivo para la extracción de fósforo a bajas concentraciones del mismo. Esto se demuestra con los valores mínimos de fósforo, los cuales siempre son más altos para la extracción con resinas de intercambio iónico que para otros métodos. Por ejemplo, para la región VII, el valor mínimo de fósforo por intercambio iónico fue 2.88; con el método de Olsen fue 1.95 ppm y con el método de Mehlich I fue 0.01 ppm. Esto indica que el método de intercambio iónico es suficientemente sensible para extraer el fósforo cuando se encuentra a concentraciones muy bajas, mientras los otros métodos no lo son.

En la Tabla 9 página 35 se muestra un resumen de la Tabla 8 página 34 con el cálculo del promedio de las 150 muestras analizadas e identificando los valores límites de todas las muestras utilizando los diferentes métodos. Así se observa que para todas las regiones cafetaleras del país, el promedio de fósforo se encuentra entre 32 y 46 ppm, según la metodología empleada. Aquí es más evidente que el método de intercambio iónico es más efectivo para la extracción de fósforo (46.50 ppm) porque extrajo en promedio 44% más que el método de Olsen Modificado (32.15 ppm) y 25% más que Mehlich I (37.16 ppm). Por lo tanto, el método de intercambio iónico tiene mejor capacidad de extracción, seguido de la metodología de Olsen Modificado y por último Mehlich I.

La columna *Desviación Estándar* de la Tabla 9 página 35 cuantifica la dispersión de los resultados de fósforo para todas las muestras analizadas según cada método evaluado. Se observa que el método de Mehlich I obtuvo mayor desviación estándar (71.73), seguido del método de intercambio iónico (58.78) y por último el método de Olsen Modificado (48.60). Esto significa que, con el método de Mehlich I, se obtienen resultados más dispersos y se puede obtener valores más extremos, sobre todo, valores muy altos. Aunque para concentraciones bajas de fósforo, el método no consigue extraer fósforo y no cuantifica nada,

para concentraciones altas de fósforo parece ser el método más efectivo en la extracción porque consiguió los valores más altos de toda la evaluación de los tres métodos.

En la Tabla 10, página 35, se muestran las relaciones entre los diferentes métodos evaluados expresadas en ecuaciones de correlación lineal. Esta información se complementa con la Tabla 11 página 36 donde se muestran los coeficientes de correlación (r^2) que expresan la calidad de ajuste de los datos obtenidos a las ecuaciones determinadas. Las variables independientes en las ecuaciones se indican dentro de paréntesis. Las variables independientes (X) son para la primera columna, el método de Olsen Modificado; para la segunda columna, el método de Mehlich I; y para la tercera columna, de nuevo el método de Olsen Modificado. Si se necesita, las ecuaciones se pueden transformar y convertir las variables por un simple despeje de variables. Los coeficientes de correlación permanecen constantes sin importar cuál variables es dependiente o independiente.

Se observa que las regiones II, III y IV obtuvieron los mayores coeficientes de correlación. Todos sobre 0.80 y el máximo fue 0.9624 que corresponde a la recta de regresión entre el método de intercambio iónico y el método de Mehlich I para la región III. En este estudio, se consideró un coeficiente mayor a 0.80 como una correlación satisfactoria de las variables. En estas regiones los métodos obtuvieron una calidad de correlación satisfactoria. Entonces se puede afirmar que, para muestras de las regiones II, III y IV, es válido emplear un solo método y a partir del resultado obtenido, conocer los demás resultados que se obtendrían aproximadamente por otras metodologías.

Como se investigó de la teoría de Química Analítica, cuando no se cuenta con muestras patrón disponible, se emplean análisis independientes para evaluar la exactitud de un método específico. Esta forma de validación consiste en evaluar diferentes métodos de análisis independientes para asegurar que el uso de un método no se vea afectado por cierto error. Los métodos independientes deben ser lo más diferentemente posibles para asegurar que no exista un error que afecte a los dos métodos. Los métodos de Mehlich I, Olsen Modificado e intercambio iónico se pueden considerar independientes porque involucran procedimientos distintos y sus reactivos son diferentes. De hecho, sus procesos completos de extracción se basan en principios distintos, como se investigó en la teoría. El hecho que se obtuvo coeficientes de correlación altos, confirma que los resultados mantienen precisión, pero se debe determinar los posibles errores aleatorios que cada método pueda tener por un análisis con ecuaciones de recta de regresión. Este análisis es válido cuando los coeficientes de correlación (r^2) son altos.

Las ecuaciones de la Tabla 10, página 35, proporcionan información valiosa sobre las diferencias entre resultados de las metodologías. La pendiente (valor que acompaña a variable independiente) y el intercepto (término constante) de las ecuaciones indica cómo se comportan los resultados en comparación con el otro método. La pendiente (m) indica la rapidez de cambio. Si es cercana a uno indica que los resultados aumentan al mismo ritmo (razón 1:1). Por ejemplo, si un método aumenta su resultado en cinco unidades, el otro método también cambiará cinco unidades. Si la pendiente es mayor a uno, por ejemplo $m = 3$, entonces el método correspondiente a la variable dependiente (Y) aumenta a un ritmo más rápido que el otro método comparado (X). Es decir, a una razón de 3:1 para pendiente $m = 3$. Por ejemplo, para la región

II, la ecuación para Mehlich I (Y) Vs. Olsen Modificado (X) es $y = 3.2975x - 27.047$, lo cual indica que el método de Mehlich I aumenta aproximadamente tres veces más rápido que los resultados de Olsen Modificado. Mientras que para la región III, la ecuación para Intercambio Iónico (Y) Vs. Mehlich I (X) es $y = 1.0513x + 19.054$, lo que indica que ambos resultados aumentan aproximadamente a una razón de 1:1.

El intercepto (b) también indica información útil; cuantifica el error sistemático entre los dos métodos correlacionados. Por lo tanto, un intercepto de $b = 10$ significa que los resultados del método Y mantienen una diferencia neta de aproximadamente 10 unidades sobre los resultados del método X. Así, por ejemplo, para la región I, la correlación Intercambio Iónico (Y) Vs. Mehlich I (X), con la ecuación $y = 0.3771x + 20.081$ tiene un intercepto $b = 20.081$, lo que indica que los resultados de intercambio iónico se encuentran aproximadamente 20.081ppm sobre los resultados de Mehlich I. Como se observa en la segunda y tercera columna de la Tabla 10, página 35, los interceptos son mayoritariamente positivos. Esto refleja, discutido anteriormente, que la extracción por intercambio iónico resultó más efectiva. Por lo tanto, los resultados por este método mantienen una diferencia neta positiva sobre los resultados de Mehlich I y Olsen Modificado.

Una observación importante de la Tabla 11 página 36 es que, si bien, en las regiones V, VI y VII, los coeficientes de correlación (r^2) fueron bajos para las primeras dos columnas (intercambio iónico Vs demás métodos), los métodos de Mehlich I y Olsen Modificado obtuvieron coeficientes r^2 altos (mayores a $r^2 = 0.80$). Esto indica que los métodos tradicionales mantienen una correlación alta, pero son diferentes sustancialmente al método de intercambio iónico.

El fósforo ha sido un elemento muy difícil de cuantificar en el análisis de fertilidad de suelo. No todo el fósforo presente en el suelo estará disponible para su absorción en las raíces de plantas; interesa conocer principalmente la cantidad de fósforo disponible que sí puede ser utilizado por los organismos vivos. Según la teoría, el método de intercambio iónico ha conseguido una correlación satisfactoria entre el fósforo cuantificado por este método y el fósforo absorbido por las plantas para su crecimiento. Sin embargo, se necesita comprobar este resultado y validar la teoría con los suelos de Guatemala. La presente investigación se limita a determinar cuál método tiene mayor poder de extracción, pero no pretende determinar cuál método correlaciona mejor con el fósforo disponible para su utilización por las plantas.

Si el método de intercambio iónico parece ser un mejor método para cuantificar el fósforo disponible en las regiones V, VI y VII, entonces se explicaría porqué los métodos de Mehlich I y Olsen Modificado son parecidos entre sí pero diferentes al intercambio iónico. Simplemente, el método de intercambio iónico sería un mejor indicador del fósforo disponible en comparación con los otros métodos. Se necesita pues realizar un estudio posterior para verificar la extracción de fósforo por intercambio iónico en función del fósforo absorbido por las plantas.

En el segundo apartado de *Resultados* se muestra los resultados obtenidos para el potasio, de la misma forma que los presentados para el fósforo. El potasio es el segundo elemento más importante analizado en la fertilidad de suelos y su concentración a niveles adecuados en el suelo es indispensable para el crecimiento normal de la planta. Su concentración se mide por conveniencia, en milimoles de carga (+) por litro (mmol/L) y se puede extraer por los mismos métodos que los evaluados para el fósforo. La

determinación por absorción atómica (AAS) hace que el potasio sea un elemento más fácil de analizar en comparación con el fósforo, que se debe cuantificar por técnicas colorimétricas, siendo éstas más susceptibles a error.

La Tabla 12 página 39 muestra los resultados de la determinación de potasio en cada región analizada y los tres métodos evaluados. Como en el caso del potasio, se observa una superioridad de extracción por intercambio iónico en los valores promedios para cada región. De hecho, se observa una marcada tendencia descendente en todas las estadísticas iniciando con el método de intercambio iónico, pasando después por los resultados de Olsen Modificado, hasta Mehlich I que obtuvo los valores más bajos en todos los parámetros.

A diferencia del fósforo, el potasio es un catión que se absorbe por la resina catiónica, junto con el calcio y magnesio que se determinan a la vez. La resina catiónica utilizada reemplaza los cationes por iones Na^+ devolviéndolos a la solución de suelo, como se observa en la información técnica de las resinas utilizadas (Ver Apéndice).

Como se observa en la Tabla 12 página 39, la región con mayor concentración de potasio es la Región V y la región con suelos de menor concentración promedio de potasio fue la Región VI. Utilizando cualquier método se obtiene la misma tendencia. En general, los métodos no tuvieron complicación para extraer contenidos muy bajos o muy altos de potasio. El método de intercambio iónico presentó mayor desviación estándar en todas las regiones, debido a que su rango de resultados es mayor. Es decir que este método fue capaz de detectar tanto concentraciones muy bajas como concentraciones muy altas.

Esto se observa mejor en la Tabla 13 página 40 donde se observa un resumen de la extracción de potasio por cada método evaluado. El rango observado de concentraciones de potasio con el método de intercambio iónico va desde 0.10 mmol c/L hasta 24.92 mmol c/L, el cual es un rango más amplio que los obtenidos por otros métodos. El promedio total de todas las muestras analizadas también superó a los demás métodos con 4.45 mmol c/L, en comparación con 3.99 mmol c/L para el método de Olsen Modificado y 3.30 mmol c/L para el método de Mehlich I. La desviación estándar total de todos los datos obtenidos para el método de intercambio iónico fue 3.51. En la Figura 10 página 40 se muestra más claramente la superioridad en extracción del método de intercambio iónico respecto a los demás. El método en promedio extrajo 11.5% más que el método de Olsen Modificado y 34.8% más que el método de Mehlich I. Una diferencia de un solo mmol c/L ya es una diferencia considerable en el análisis de fósforo para cualquier suelo, por lo tanto se podría afirmar que el método de Mehlich es deficiente para la extracción de potasio, Olsen Modificado es levemente débil y el método de Intercambio Iónico devuelve resultados mayores.

Sin embargo, como en el caso del fósforo, se necesita realizar un estudio posterior para analizar si los datos obtenidos de potasio por el método de intercambio iónico correlacionan satisfactoriamente con el total de potasio absorbido y utilizado por la planta en un sistema cerrado. De nuevo, interesa más el potasio disponible para la planta que el total de potasio presente en el suelo. Es muy poco probable, sin embargo, que exista potasio de una forma poco disponible para la planta, dado que es un catión que no forma complejos con otros compuestos o elementos que lo inhabiliten para su adsorción. Además, su radio iónico

es menor que los demás elementos analizados, lo que facilita su transporte e intercambio en la superficie de las resinas poliméricas.

Como se observa en la Tabla 14 página 40, los resultados para los tres métodos mantienen ecuaciones muy parecidas de correlación. La mayoría de pendientes son cercanas a 1, lo que indica un ritmo de cambio proporcional y equitativo. Las pendientes son en su mayoría cercanas a cero, lo que indica que no parece existir un error aleatorio considerable entre los métodos. Salvo el caso de la correlación Intercambio Iónico Vs. Mehlich I para las regiones II, III y IV, donde los interceptos son altos ($b = 19.391, 19.054, 16.169$), lo que indica una diferencia neta considerable entre ambos métodos que beneficia al método de intercambio iónico.

Estas ecuaciones proporcionan información confiable e importante porque los coeficientes de correlación son confiables. Como se observa en la Tabla 15 página 41, la mayoría de coeficientes de correlación son mayores a 0.80 (de hecho, la mayoría supera el $r^2 = 0.90$) que demuestra una correlación fuerte entre los métodos. A excepción de la región VI, donde los coeficientes fueron bajos ($r^2 = 0.411$ para Intercambio iónico Vs. Olsen Modificado y $r^2 = 0.5051$ para Intercambio Iónico Vs. Mehlich I), el uso de determinado método para una muestra puede ayudar a conocer el resultado de otro método para la misma muestra, calculando valor aproximado a través las ecuaciones de recta mostradas en la tabla anterior; i.e., la alta correlación permite pronosticar valores aproximados entre los métodos. La región VI no mantuvo una correlación importante entre los métodos que puede estar relacionado con las mismas propiedades del suelo, como la situación observada en el fósforo. Aunque el método de intercambio iónico extrajo más potasio en esta región, un estudio de correlación de potasio medido versus potasio extraído por planta definirá cuál método es más apropiado para esta región.

Los resultados de extracción de calcio se muestran después de los de potasio. Se comparó el método de intercambio iónico con la extracción por cloruro de potasio porque actualmente éste último es el método más utilizado en el país para evaluar la concentración presente de calcio y magnesio. El método de Mehlich I también es capaz de extraer calcio y magnesio, pero no se evaluó en este estudio porque se dio prioridad a la evaluación del método con KCl por ser el utilizado en el Laboratorio donde se llevó a cabo la evaluación. Así, el método de Mehlich I se utilizó por mucho tiempo para evaluar el fósforo y el potasio hasta ser sustituido por el método de Olsen Modificado. El método de intercambio iónico ya ha empezado a sustituir al método de Olsen Modificado en varios países donde se ha demostrado que tiene un mejor poder de extracción y simula una mejor adsorción de los nutrientes del suelo por las raíces de la planta. Por lo tanto, este estudio puede contribuir al desarrollo e implementación de este método en el país, siempre y cuando se complemente, como ya se mencionó, con un estudio de adsorción de nutrientes por parte de la planta en crecimiento para verificar la similitud de las resinas de intercambio con las raíces de las plantas.

Como se observa en los resultados del calcio en la Tabla 17 página 42, el método de intercambio iónico no obtuvo la mayoría de promedios más altos de extracción. Únicamente en la región II, la extracción promedio por intercambio iónico fue mayor que la extracción por cloruro de potasio. Esto indica que el nuevo método es deficiente en comparación con el método KCl. En la Tabla 16 página 41 se muestra un

resumen de la extracción por ambos métodos y se observa que el método de cloruro de potasio extrajo en promedio 19.3% más que el método de intercambio iónico. Los límites mínimos y máximos permanecieron sin diferencias significativas, así como la desviación estándar de todas las muestras ($s_2 = 44.753$ para intercambio iónico y 47.32 para cloruro de potasio). Esto indica que ambos métodos son capaces de operar a los mismos rangos de concentración de calcio sin dificultad.

En la región IV se observa un valor particularmente muy alto que aumenta el rango hasta un valor máximo de 354.25 mmol_e/L para el método de intercambio iónico –y 342.00 mmol_e/L para cloruro de potasio–. Este valor corresponde a la muestra No. 14 de esta región (Ver, Tabla 65 página 110). Se explica este valor alto porque el suelo analizado había sido tratado previamente con cal hidratada (CaO), que aumenta significativamente la concentración de calcio y aumenta los niveles de pH del suelo. Este valor de 354.25 mmol c/L se encuentra fuera de los límites normales de calcio por lo que se explica que debió haber sido tratada con cal para su corrección.

En la Figura 11 página 41 se muestra de forma más clara la deficiencia del método de intercambio iónico en comparación con el método de cloruro de potasio. Se puede explicar esta deficiencia suponiendo dos razones principales: primero, el calcio es un catión más difícil de extraer debido a su carga iónica, a su mayor peso atómico y densidad en comparación con los cationes K⁺ o Na⁺, dificultando así su transferencia hacia la superficie de las resinas y su intercambio por otros cationes dentro de la matriz de las mismas. La segunda razón se debe a una mayor dificultad para liberar los iones Ca²⁺ durante la regeneración de las resinas. En la Figura 3 página 9 se muestra cómo ocurre la deionización de las resinas para formar la solución catiónica.

El método de cloruro de potasio es diferente al método de intercambio iónico porque no involucra una matriz intermedia para la captura, transporte y liberación de los cationes Ca²⁺ hasta una solución medible. En cambio, extrae directamente los cationes con una solución extractora y cuantifica el total de calcio en esa misma solución, evitando así pérdidas por transporte o atrapamiento de iones. La ventaja de extracción de este método es evidente. Sin embargo, existe la posibilidad que las resinas de intercambio mantengan una similitud fuerte con la raíces de las plantas. Se necesita pues evaluar también la capacidad real de las plantas para adsorber calcio del suelo y comprobar qué método se ajusta mejor a la acción de las raíces.

En la Tabla 18 página 43, se observa cómo se relacionan ambos métodos por ecuaciones de rectas. Las pendientes se mantienen todas menores a 1, pero no parece existir una tendencia clara de los valores interceptos, que en algunas regiones son positivos y en otras negativos. Ambos métodos tienen una correlación muy diferente para cada región, que se explica en función de las diversas propiedades del suelo entre las regiones, como lo mencionado anteriormente. Las regiones parecen reaccionar diferente para cada método de acuerdo a sus propiedades. Sin embargo, los coeficientes de correlación r^2 tabulados en la Tabla 19 página 43 muestran que en las regiones II, III, IV y VI se obtuvieron coeficientes mayores a 0.80 que muestran una correlación alta entre los métodos. El resto de regiones, I, V y VII, no mostraron una correlación satisfactoria. Por lo tanto, se puede afirmar que la mayoría de regiones mantuvieron una correlación entre métodos. Pero los resultados por intercambio iónico parecen mantenerse generalmente

menores que el cloruro de potasio debido a las pendientes menores a 1 y los términos constantes negativos de algunas ecuaciones de rectas.

Resultados muy parecidos al calcio fueron los obtenidos para el magnesio como se muestra desde la Tabla 20 página 44 en adelante. El método de extracción por cloruro de potasio mantuvo superioridad al método de intercambio iónico, que se refleja en valores de extracción promedio más altos para la mayoría de regiones. El catión magnesio Mg^{2+} es muy parecido al catión Ca^{2+} debido a su carga iónica y varias propiedades químicas dado que pertenecen a la misma familia de metales alcalinotérreos. Por lo tanto, se espera que los resultados de extracción de calcio y magnesio sean muy parecidos al evaluar ambos métodos.

Como se observa en la Tabla 21 página 44, la extracción por cloruro de potasio extrajo en promedio 26.4% más que el método de intercambio iónico. En la Tabla 22 página 45, se observa que las ecuaciones de recta mantienen pendientes menores a 1, como en el caso del calcio. Y en la Tabla 23 página 45 se observa que cuatro regiones mantienen una correlación satisfactoria entre ambos métodos: las regiones III, IV, V y VI. Las demás no fueron satisfactorias. Estas diferencias también se pueden explicar por las diferentes propiedades de los suelos para cada región.

En el capítulo de Anexos se encuentran todas las gráficas de dispersión de puntos, correspondientes a todas las ecuaciones de rectas calculadas entre los métodos. Estas figuras se clasifican según el elemento extraído y la región evaluada y están disponibles para su referencia cuando se desee visualizar la relación entre dos métodos para una región específica. En este mismo capítulo de Anexos se encuentra la información geográfica de las muestras, que incluye Región, Departamento, Localidad y coordenadas en sistema UTM para futura referencia (Tabla 24 a la Tabla 30, página 68 a la página 74).

De la Tabla 31 a la Tabla 60 (página 75 a la página 103) se encuentran tabulados también todos los datos obtenidos en el análisis de las muestras por los diferentes métodos. Se observa que para el método de intercambio iónico se realizó hasta 6 repeticiones por muestra en dos días diferentes de análisis. Esto se realizó con el objetivo de minimizar el error en las diferentes mediciones y evaluar la precisión del método. Dado que el método de intercambio iónico es un método nuevo que no se había llevado a cabo antes en el laboratorio, se realizó múltiples análisis previos para conseguir la suficiente repetitividad y reproducibilidad. Se identificaron puntos críticos y se instaló y adecuó todo el equipo para conseguir eficiencia en el análisis rutinario. Alcanzadas estas condiciones, se procedió al análisis de las 150 muestras, cada una en dos días distintos de análisis para comprobar la repetitividad en el método.

A nivel de laboratorio se exige que los coeficientes de variación para diferentes mediciones de fósforo se mantengan en un máximo de 25% y 30%. En el subcapítulo de Datos Calculados, de la Tabla 62 a la Tabla 68 (página 108 a la página 114), se muestran los promedios y coeficientes de variación calculados para todas las 150 muestras. Se observa que ninguna muestra supera el 25% de coeficiente de variación, por lo que se afirma que las diferentes mediciones de fósforo fueron suficientemente repetitivas en los diferentes días de análisis.

Para el caso del calcio, magnesio y potasio, se exige que el coeficiente de variación no supere el 15%. De nuevo en estas tablas se observa que los coeficientes de variación se mantienen en un nivel adecuado para darle confiabilidad los resultados. Además, se optó por realizar repeticiones extras en caso que no se contaba con suficientes datos para una sola muestra. Un análisis de laboratorio exige un mínimo de tres repeticiones para obtener un resultado confiable, por eso se exigió un mínimo de tres repeticiones para cada muestra, como se observa en las tablas de datos obtenidos.

En el caso de las metodologías de Olsen Modificado, Mehlich I y Cloruro de potasio, sólo se realizó una medición por muestra, sin repeticiones. Se trabajó de esta manera porque actualmente estos métodos se encuentran certificados dentro del Laboratorio y, por lo tanto, proveen resultados confiables. No se consideró necesaria la repetición de las mediciones dado que el error se reduce con el número grande de muestras analizadas.

Gracias a que esta investigación fue promovida y financiada por la Asociación Nacional del Café, se aprovechó la oportunidad de solicitar al Sistema de Información Geográfica la elaboración de un mapa con niveles de fósforo para las regiones cafetaleras analizadas a partir de los resultados obtenidos por el método de intercambio iónico. Este mapa se muestra en la Figura 8 página 37 y en la Figura 9 página 38. El primer mapa muestra una distribución general de los puntos de muestreo y los niveles de fósforo determinados para todas las regiones, mientras que la Figura 9, muestra un acercamiento en el Departamento de Huehuetenango donde se observa una agrupación de puntos altos que forman un área de concentración alta de fósforo.

Para fines de este estudio, la distribución de los puntos de muestreo se realizó en función de la localización de las áreas cafetaleras. El objetivo de este mapa es una mejor visualización de los resultados para observar efectividad de extracción del método de intercambio iónico según las áreas geográficas del país. El mapa elaborado en este estudio no se debe utilizar como un mapa de manejo para la toma de decisiones en la aplicación de tratamientos de suelo. Sería incorrecto afirmar, por ejemplo, que en toda el área cafetalera de Huehuetenango las plantas de café se ven por las altas concentraciones de fósforo y mucho producto debe ser descartado. De nuevo, este mapa muestra los niveles de extracción de fósforo pero no es efectivo para fines de manejo de suelo o para observar la disponibilidad del nutriente en las regiones. Para elaborar un mapa efectivo de manejo se necesita realizar el muestreo a partir de una cuadrícula con puntos equidistantes por toda el área de la República, comprobando previamente que el método correlaciona satisfactoriamente con el desarrollo de las plantas. Así se puede delimitar mejor las áreas de disponibilidad de fósforo para los cultivos de café.

Para elaborar estos mapas se trabajó con el software *ARCGIS 10®*, utilizando la herramienta de análisis *Spatial Analyst*. Más específicamente, se seleccionó el método de análisis por interpolación para el análisis de los datos. Este método permite obtener mejor información a partir de una mayor cantidad de datos porque funciona haciendo predicciones a partir de conglomerados (o *clusters*) de puntos. A partir de 12 puntos parecidos, el programa los une en grupos y delimita un área con un nivel específico de fósforo. Luego de haber delimitado varias áreas, el programa procede a completar los espacios en función del

comportamiento de los grupos hasta completar toda el área deseada. Para distinguir los diferentes niveles de fósforo, se estableció intervalos bajos, medios y altos y se les asignó colores como se observa las leyendas de cada figura.

En el departamento de Huehuetenango, se observa una mayor variabilidad de datos y se concentran los puntos más altos de extracción (Ver Figura 9 página 38). Esto se debe en parte a la geografía y propiedades específicas de los suelos en esta área, y en parte también a las técnicas de fertilización artificial empleadas. En Huehuetenango, a diferencia del resto de regiones cafetaleras, las fincas son pequeñas lo cual influye en la técnica de fertilización empleada. Se utiliza bastante fertilizante alto en fósforo para una menor área. En cambio en las fincas grandes, localizadas en departamentos como San Marcos, Quetzaltenango, Suchitepéquez, Chimaltenango y Santa Rosa, las técnicas de adición de fósforo son moderadas debido a la vasta extensión de las fincas donde es muy costosa la aplicación de grandes cantidades de fertilizante. Por estas razones junto con la geografía de suelos, Huehuetenango presenta una mayor concentración de niveles altos.

En las áreas de las Verapaces, Chiquimula, El Progreso, Chiquimula y Zacapa, la extracción fue débil y el suelo parece tener una concentración baja de fósforo. En la franja cafetalera que cruza el país de Oriente a Occidente que incluye los departamentos de San Marcos, Quetzaltenango, Retalhuleu, Sololá, Suchitepéquez, Chimaltenango, Escuintla, Sacatepéquez, Guatemala, Santa Rosa, Jalapa y Jutiapa, la concentración de fósforo parece ser moderada y la extracción se mantiene en un rango de 30 a 80 ppm con poca variabilidad. En esta área se produce la mayor cantidad de café del país, lo cual favorece al uso del método de intercambio iónico porque posibilita el análisis de estos suelos más importantes al ajustarse satisfactoriamente al rango de medición del método.

En el capítulo de Apéndice, se encuentra el subcapítulo *Curvas de equilibrio de adsorción*, página 147, donde se muestran las curvas que describen los procesos de adsorción de los iones de interés sobre las resinas de intercambio, que actúan como el adsorbato. Como se menciona en la teoría, el proceso de intercambio iónico se puede describir satisfactoriamente como un caso de adsorción a través de la ecuación de Freundlich. Se realizó pruebas adicionales para obtener estos resultados y fueron útiles para determinar que las concentraciones de los elementos son bajas en comparación con el nivel de saturación de las resinas. Esto comprueba que no se obtuvo resultados erróneos de extracción por falta de capacidad de intercambio en las resinas. Es decir que la capacidad de intercambio de las resinas siempre fue suficiente para extraer los elementos de interés incluso en las muestras con concentraciones más altas.

IX. CONCLUSIONES

A. Para el fósforo:

1. A través de un análisis por el método de intercambio iónico, las regiones cafetaleras tienen un promedio de fósforo, en orden de mayor a menor, como sigue: Región V (91.54 ppm), Región IV (53.85 ppm), Región III (53.54 ppm), Región II (33.03 ppm), Región I (32.32 ppm), Región VII (26.33 ppm) y Región VI (12.17 ppm).
2. A través de un análisis por el método de Olsen Modificado, las regiones cafetaleras tienen un promedio de fósforo, en orden de mayor a menor, como sigue: Región V, Región IV, Región III, Región II, Región I, Región VII y Región VI. Este orden es igual al obtenido por el método de intercambio iónico.
3. A través de un análisis por el método de Mehlich I, las regiones cafetaleras tienen un promedio de fósforo, en orden de mayor a menor, como sigue: Región V, Región IV, Región III, Región I, Región II, Región VII y Región VI.
4. El promedio de fósforo determinado por el método de intercambio iónico para todas las regiones cafetaleras es 46.50 ppm. Por el método de Olsen Modificado el promedio es 32.15 ppm y por el método de Mehlich I es 37.16 ppm.
5. El método de intercambio iónico extrae en promedio 44.63% más de fósforo que el método de Olsen Modificado en todas las regiones cafetaleras. Y en comparación con Mehlich I, el método de intercambio iónico extrae en promedio 25.13% más de fósforo en todas las regiones.
6. El rango de fósforo presente en todas las regiones cafetaleras va desde 1.83 ppm hasta 271.99 ppm determinado a través del método de intercambio iónico.
7. El análisis de fósforo por el método de Intercambio Iónico para las regiones II, III, IV y VII devuelve resultados que pueden correlacionarse satisfactoriamente con el método de Olsen Modificado y con el método de Mehlich I.
8. El análisis de fósforo por el método de intercambio iónico para las regiones I, V y VI devuelve resultados que no pueden correlacionarse satisfactoriamente con el método de Olsen Modificado o con el método de Mehlich I.
9. Los métodos de Olsen Modificado y Mehlich I devuelven resultados que pueden correlacionarse satisfactoriamente entre sí para todas las regiones, excepto la región I.

B. Para el potasio:

10. A través de un análisis por el método de intercambio iónico, las regiones cafetaleras tienen un promedio de potasio, en orden de mayor a menor, como sigue: Región V (6.7 mmol c/L), Región

III (5.14 mmol c/L), Región IV (5.08 mmol c/L), Región II (4.37 mmol c/L), Región VII (3.76 mmol c/L), Región I (3.16 mmol c/L) y Región VI (2.02 mmol c/L).

11. A través de un análisis por el método de Olsen Modificado, las regiones cafetaleras tienen un promedio de potasio, en orden de mayor a menor, como sigue: Región V, Región III, Región IV, Región VII, Región II, Región I y Región VI.
12. A través de un análisis por el método de Mehlich I, las regiones cafetaleras tienen un promedio de fósforo, en orden de mayor a menor, como sigue: Región V, Región III, Región IV, Región II, Región VII, Región I y Región VI. Este orden es igual al obtenido por el método de intercambio iónico.
13. El promedio de potasio determinado por el método de intercambio iónico para todas las regiones cafetaleras es 4.45 mmol c/L. Por el método de Olsen Modificado el promedio es 3.99 mmol c/L y por el método de Mehlich I es 3.30 mmol c/L.
14. El método de intercambio iónico extrae en promedio 11.52% más de potasio que el método de Olsen Modificado en todas las regiones cafetaleras. Y en comparación con Mehlich I, el método de intercambio iónico extrae en promedio 34.84% más de potasio en todas las regiones.
15. El rango de potasio presente en todas las regiones cafetaleras va desde 0.10 mmol c/L hasta 24.92 mmol c/L determinado a través del método de intercambio iónico.
16. El análisis de potasio por el método de Intercambio Iónico para todas las regiones, exceptuando la Región VI, devuelve resultados que pueden correlacionarse satisfactoriamente con el método de Olsen Modificado y con el método de Mehlich I.
17. Los métodos de Olsen Modificado y Mehlich I devuelven resultados que pueden correlacionarse satisfactoriamente entre sí para todas las regiones, excepto la región VI.

C. Para el calcio:

18. A través de un análisis por el método de intercambio iónico, las regiones cafetaleras tienen un promedio de calcio, en orden de mayor a menor, como sigue: Región IV (67.73 mmol c/L), Región V (64.44 mmol c/L), Región III (42.45 mmol c/L), Región VII (34.13 mmol c/L), Región II (22.89 mmol c/L), Región VI (22.59 mmol c/L) y Región I (14.02 mmol c/L).
19. A través de un análisis por el método de Cloruro de Potasio, las regiones cafetaleras tienen un promedio de calcio, en orden de mayor a menor, como sigue: Región IV, Región V, Región III, Región VII, Región VI, Región II y Región I.
20. El promedio de calcio determinado por el método de intercambio iónico para todas las regiones cafetaleras es 38.97 mmol c/L, mientras para el método de Cloruro de Potasio el promedio de calcio para todas las regiones es de 47.57 mmol c/L.
21. El método de Cloruro de Potasio extrae en promedio 22.07% más de calcio que el método de Intercambio Iónico en todas las regiones cafetaleras.

22. El rango de calcio presente en todas las regiones cafetaleras va desde 2.23 mmol c/L hasta 354.25 mmol c/L determinado a través del método de intercambio iónico. Y a través del método de Cloruro de Potasio, el rango va desde 0.50 mmol c/L hasta 342.00 mmol c/L para todas las regiones cafetaleras.
23. El análisis de calcio por el método de Intercambio Iónico para las regiones II, III, IV y VI, devuelve resultados que pueden correlacionarse satisfactoriamente con el método de Cloruro de Potasio. Para el resto de regiones, I, V y VII, esta correlación no es satisfactoria.

D. Para el magnesio:

24. A través de un análisis por el método de intercambio iónico, las regiones cafetaleras tienen un promedio de magnesio, en orden de mayor a menor, como sigue: Región V (18.94 mmol c/L), Región IV (17.57 mmol c/L), Región III (11.78 mmol c/L), Región VI (9.03 mmol c/L), Región VII (8.08 mmol c/L), Región II (5.86 mmol c/L) y Región I (4.54 mmol c/L).
25. A través de un análisis por el método de Cloruro de Potasio, las regiones cafetaleras tienen un promedio de magnesio, en orden de mayor a menor, como sigue: Región IV, Región V, Región III, Región VII, Región VI, Región II y Región I.
26. El promedio de magnesio determinado por el método de intercambio iónico para todas las regiones cafetaleras es 14.04 mmol c/L, mientras para el método de Cloruro de Potasio el promedio de magnesio para todas las regiones es de 11.11 mmol c/L.
27. El método de Cloruro de Potasio extrae en promedio 26.37% más de magnesio que el método de Intercambio Iónico en todas las regiones cafetaleras.
28. El rango de magnesio presente en todas las regiones cafetaleras va desde 0.66 mmol c/L hasta 57.52 mmol c/L determinado a través del método de intercambio iónico. Y a través del método de Cloruro de Potasio, el rango va desde 1.00 mmol c/L hasta 130.40 mmol c/L para todas las regiones cafetaleras.
29. El análisis de magnesio por el método de Intercambio Iónico para las regiones III, IV, V y VI, devuelve resultados que pueden correlacionarse satisfactoriamente con el método de Cloruro de Potasio. Para el resto de regiones, I, II y VII, esta correlación no es satisfactoria.

X. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda evaluar las metodologías de intercambio iónico, Olsen Modificado, Mehlich I y Cloruro de Potasio contra muestras de suelos patrones con concentraciones conocidas. Idealmente se debe analizar diferentes muestras patrón del país para evaluar el rendimiento de cada método en cada región. Sin embargo, las muestras patrón disponibles provienen únicamente instituciones extranjeras. Por lo tanto, se recomienda adquirir varias muestras patrón de diferentes propiedades físicas y químicas y analizarlas por los cuatro métodos evaluados. De esta forma, se puede determinar cuál método es más exacto para una gama de suelos diferentes.
2. En países como EEUU y Brasil, el método de intercambio iónico ha conseguido una correlación satisfactoria entre el fósforo cuantificado por este método y el fósforo absorbido por las plantas durante su crecimiento. Se recomienda comprobar este resultado y validar la teoría con los suelos de Guatemala. La presente investigación se limita a determinar cuál método tiene mayor poder de extracción, pero no pretende determinar cuál método correlaciona mejor con la concentración de fósforo disponible para su utilización por las plantas.
3. Utilizar el método de Espectroscopía de emisión por plasma de acoplamiento inductivo (ICP) para la determinación de concentraciones de elementos en suelos después de la extracción por el método de intercambio iónico. De esta forma, la sensibilidad aumenta para la mayoría de elementos desde microgramos hasta nanogramos por L y se tiene la ventaja de poder medir elementos simultáneamente mientras todos los elementos.
4. El método de análisis por intercambio iónico en las fuentes bibliográficas carece de un procedimiento que explique cómo descartar adecuadamente las resinas usadas. Se recomienda recurrir al método de incineración para la eliminación del material, o bien, por deposición en un vertedero sanitario, según sea la opción más viable. En otros países, diferentes de Guatemala, existen servicios especiales de eliminación para resinas de intercambio usadas. En estos casos, se recomienda contactar al proveedor de resinas de intercambio para obtener información sobre estos servicios.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Baeza Reyes, Alejandro; García Mendoza, Arturo. 2011. *Principios de Electroquímica Analítica*. Documentos de apoyo. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. 80 págs.
- Díaz-Romeu, Roberto. 1978. *Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal e investigación en invernadero*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 115 págs.
- Helfferrich, F. 1962. *Ion Exchange*. New York. McGraw-Hill. Pág. 624.
- Palma Vargas, Gonzalo. 1970. *Uso de resinas de intercambio iónico para evaluar la disponibilidad de fósforo en suelos*. Tesis de Grado de Magister Scientiae. Costa Rica. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. 95 páginas.
- Purolite. 2002. *The Disposal Of Used Ion Exchange Resins*. Purolite Service Bulletin. The Purolite Company. PA, USA. Impreso en Inglaterra. Consulta en Internet. Disponible en: <http://www.cleanmywater.com/dmdocuments/Filtering%20Media/purolite/DISPOSAL%20BULLETIN.pdf>
- Raij, B. van; Quaggio, J. A. 1983. *Métodos De Análise De Solo Para Fins de Fertilidad*. Campinas, Instituto Agronómico. Págs. 31.
- Raij, B. van; Quaggio, J. A.; Silva, N. M. da. 1985. *Extraction Of Phosphorus, Potassium, Calcium And Magnesium From Soils By An Ion-Exchange Procedure*. Communications In Soil Science And Plant Analysis. New York. Volumen 16. Número 13. Págs. 245-260.
- Raij, B. van; De Andrade, J. C.; Cantarella, H.; Quaggio, Jose Antonio. 2001. *Análise Química Para Avaliação Da Fertilidade De Solos Tropicais*. Instituto Agronómico Campinas. Gobierno del Estado de Sao Paulo. Campinas. 284 págs.
- Raij. B. van; Cantarella, H.; Quaggio, J.A.; Prochnow, L. 2009 *Ion Exchange Resin For Assesing Phosphorous Availability In Soils*. Revista Better Crops. Volumen I. Número 93. Páginas 23-25.
- Ramos, Norvin Ariel. 2003. *Evaluación del fósforo extraído con dos soluciones extractoras en 19 suelos del altiplano occidental de Guatemala*. Tesis de Grado de Ingeniería Agronómica. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. 51 páginas.
- Romeu, R.; Hunter, A. 1978. *Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal e investigación de invernadero*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Costa Rica.
- Samuelson, Olof. 1963. *Ion Exchange Separations In Analytical Chemistry*. John Wiley & Sons. Nueva York. 474 págs.

- Schweizer, S.; Coward, H.; Vásquez, A. 1980. *Metodología para análisis de suelos, aguas y plantas*. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Boletín No. 68. 1ª. Edición. San José, Costa Rica.
- Skoog, Douglas. 2005. *Fundamentos de Química Analítica*. 8ª edición. Editorial Thomson. México D.F. 1065 págs.
- Soil Survey Staff. 2006. *Claves para la Taxonomía de suelos*. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Décima Edición.
- Sumner, Malcom E. 2000. *Handbook Of Soil Science*. CRC Press. Boca Raton, FL, Estados Unidos. 2313 págs.
- The Perkin-Elmer Corporation. 1978. Instructions: Atomic Absorption Spectrophotometer. Model 703. U.S.A.
- Treybal, Robert. 1988. *Operaciones de Transferencia de Masa*. Segunda Edición. McGrawHill. México. pp 378 a la 528.

XII. APÉNDICE

A. Procedimiento

Para los diferentes análisis, se siguió los siguientes procedimientos citados de las referencias bibliográficas:

1. Método de extracción por intercambio iónico: Método tomado del capítulo 11: “Determinación de fósforo, calcio, magnesio y potasio extraídos con resina intercambiadora de iones” del libro *Análise Química Para Avaliação Da Fertilidade De Solos Tropicais*. Escrito por Bernardo Van Raij y Jose Antonio Quaggio, publicado en el año 2001 por el Instituto Agronómico de Campinas. El capítulo se localiza de la página 189 a la 199. El único cambio realizado fue que no se utilizó gelatina para análisis para preparar la solución diluida de molibdato. No es necesaria para la determinación espectrofotométrica del fósforo y puede ser omitida cuando no está disponible.

2. Método de Olsen Modificado: Método tomado del capítulo 1: “Solución extractora modificada de NaHCO_3 ” del libro *Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal e investigación en invernadero*, escrito por Roberto Díaz-Romeu, publicado en el año 1978 por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza en Turrialba, Costa Rica. El método se localiza de la página 9 a la página 13. No se realizó ningún cambio en la metodología.

3. Método de Mehlich I: Método tomado del capítulo 5: “Solución extractora de ácido débil: 0.05 N de HCl y 0.025 N de H_2SO_4 ” del libro *Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal e investigación en invernadero*, escrito por Roberto Díaz-Romeu, publicado en el año 1978 por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza en Turrialba, Costa Rica. El método se localiza de la página 14 a la página 18. No se realizó ningún cambio en la metodología.

4. Método de extracción con Cloruro de Potasio KCl 1N: Método tomado del capítulo 2: “Solución extractora de Cloruro de Potasio (KCl) 1N” del libro *Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal e investigación en invernadero*, escrito por Roberto Díaz-Romeu, publicado en el año 1978 por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza en Turrialba, Costa Rica. El método se localiza de la página 20 a la página 22. No se realizó ningún cambio en la metodología.

B. Diagrama de flujo

Figura 13. Diagrama de flujo de la extracción de suelo con mezclas de resinas intercambiadoras de iones.

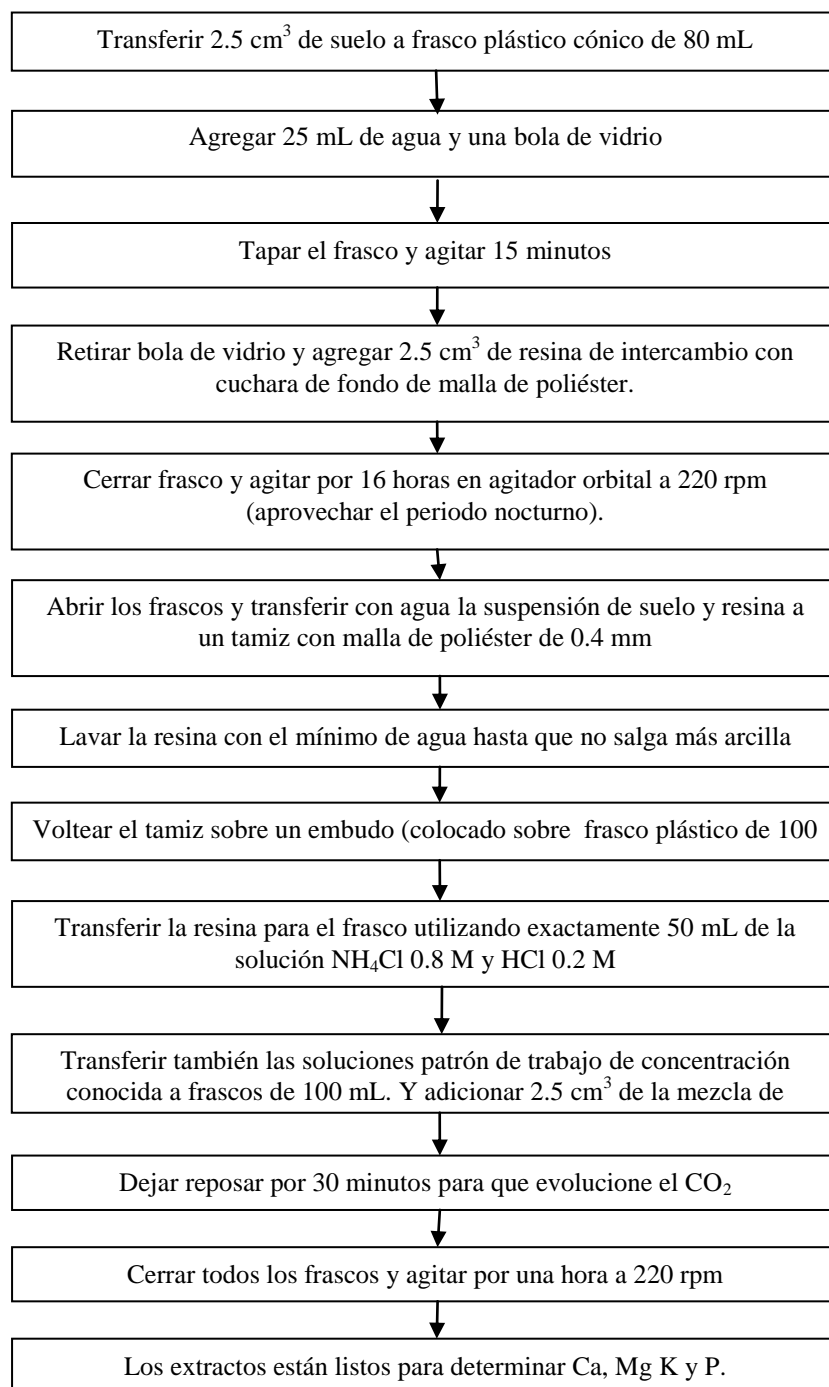
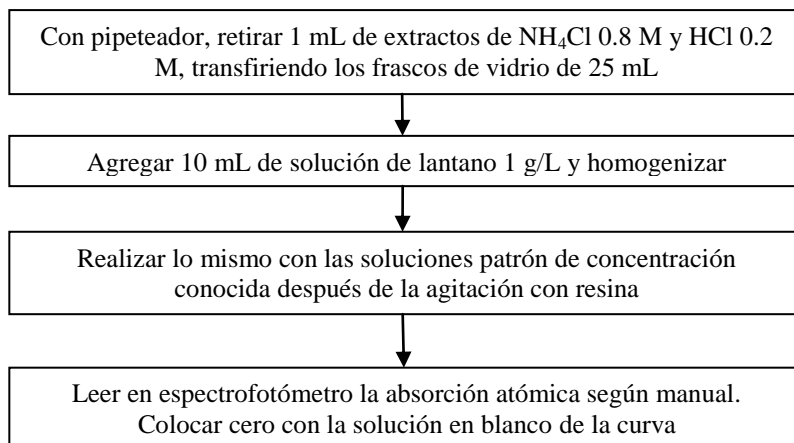
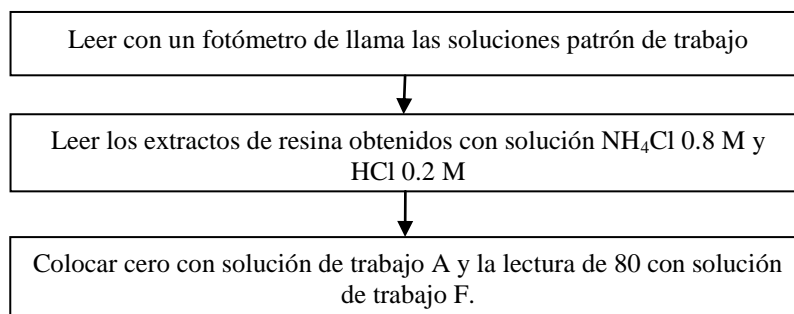
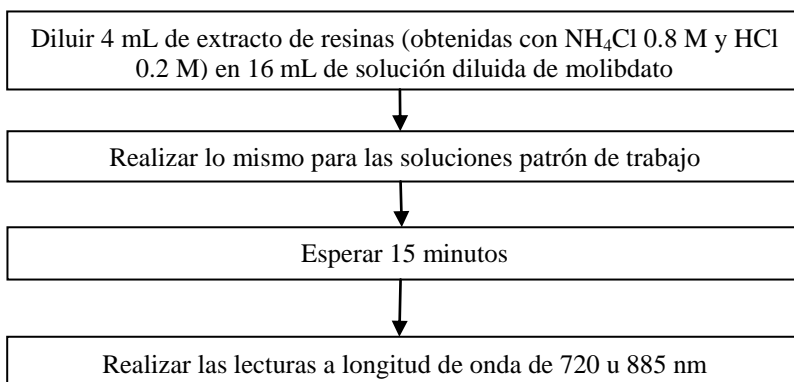


Figura 14. Diagrama de flujo de la determinación de Ca Mg**Figura 15.** Diagrama de flujo de la determinación de K**Figura 16.** Diagrama de flujo de la determinación espectrofotométrica de P.

C. Equipo utilizado

Para el método de intercambio iónico, se utilizó el siguiente equipo:

1. Mesa agitadora orbital para suelos.

Modelo MA-376

Marca Marconi Equipo Para Laboratorios LTDA©

No. Serie 113180074

Watts 250. Volts 220

Inspección de control de calidad: 13/01/2011

2. Recuperador de resinas de intercambio iónico.

Modelo MA-308

Marca Marconi Equipo Para Laboratorios LTDA©

No. Serie 113180074

3. Espectrofotómetro UV Visible.

Modelo Lambda 25

Marca Perkin Elmer©

No. Serie 501508121206

100 – 240 VAC 3.15 Amp Tipo T. 250V

Última calibración: 13/07/2011

4. Espectrofotómetro de Absorción Atómica.

Modelo AAnalyst 400

Marca Perkin Elmer©

No. Serie 201S7060805

Última calibración: 09/09/2011

D. Reactivos utilizados

Para el método de intercambio iónico, se utilizó una mezcla de dos tipos de resinas intercambiadoras de iones. Estas tienen la siguiente información técnica.

1. Resina de intercambio aniónica de base fuerte A-400 Tipo I:

Marca: Purolite© Ion Exchange Resins.

Estructura de matriz del polímero: Poliestireno entrecruzado con divinilbenceno.

Apariencia y forma física: cuentas esféricas doradas y claras.

Grupos funcionales: Amonio cuaternario Tipo I.

Forma iónica de envío: Cl-1

Tamaño de partícula: +1.2 mm < 2%, -0.3 mm < 1%

Gravedad específica: 1.08 (en húmedo)

Retención de humedad: 48% a 54% en forma de Cl-1

Capacidad total de intercambio: 1.3 eq/L/min (en húmedo)

Temperatura de operación: 100°C máximo

Rango de pH para estabilidad: 0 – 13

2. Resina de intercambio catiónica de ácido fuerte C-100:

Marca: Purolite© Ion Exchange Resins.

Estructura de matriz del polímero: Poliestireno entrecruzado con divinilbenceno.

Apariencia y forma física: cuentas esféricas claras.

Grupos funcionales: R-SO₃-1

Forma iónica de envío: Na+1

Tamaño de partícula: +1.2 mm < 5%, -0.3 mm < 1%

Gravedad específica: 1.29 (en húmedo)

Retención de humedad: 44% a 48% en forma de Cl-1

Capacidad total de intercambio: 2.0 eq/L/min (en húmedo)

Temperatura de operación: 150°C máximo

Rango de pH para estabilidad: 0 – 14

E. Información de muestras analizadas

Tabla 24. Información de suelos de Región I

No.	Departamento	Localidad	Finca	Lote	Latitud	Longitud
1	San Marcos	San Rafael Pie de la Cuesta	El Panorama	Concepción 008	14.915333	-91.912100
2	San Marcos	San Rafael Pie de la Cuesta	Las Merceditas	Panorama	14.920103	-91.903817
3	San Marcos	San Pablo	Cooperativa La Bendición	Las Perlas	14.972750	-91.959633
4	San Marcos	San Pablo	Cooperativa La Igualdad	Las Pilas	14.991350	-91.940417
5	San Marcos	La Reforma	La Fe	El Caracol	14.749861	-91.863833
6	Quetzaltenango	Colomba, Costa Cuca	Magnolia Miramar	Elvira Pérez	14.801833	-91.745750
7	San Marcos	Malacatán	San Luis Malacatán	La Paz 2009	14.984050	-92.102375
8	San Marcos	Tajumulco	ACIPACU	Recepa 16	15.021417	-91.971222
9	San Marcos	El Rodeo	Los Cerros	Sección A	14.911650	-91.972000
10	San Marcos	El Rodeo	Cooperativa La Esperanzita	Las Casas	14.903367	-91.992528
11	San Marcos	Nuevo Progreso	La Viena	Oswaldo Vásquez	14.820639	-91.914028
12	Quetzaltenango	Colomba, Costa Cuca	Santa Anita La Unión	El Beneficio	14.728833	-91.745528
13	San Marcos	San Rafael Pie de la Cuesta	Cooperativa Comunidades	Nueva Italia	14.895500	-91.745528
14	San Marcos	Nuevo Progreso	Cooperativa Nuevo Edén	Sabino Hernández	14.815361	-91.905722
15	San Marcos	La Reforma	El Pilar	La Finca	14.786850	-91.858617
16	San Marcos	El Quetzal	Santa Marta	Amparito	14.759517	-91.843250
17	San Marcos	La Reforma	Santa Margarita	Santa Elena	14.824067	-91.796600
18	San Marcos	El Tumbador	La Colonia	Nahuatán	14.825983	-91.955267
19	San Marcos	Nuevo Progreso	Berlín	Lote No. 2	14.826183	-91.843250
20	Quetzaltenango	Colomba, Costa Cuca	San Carlos Miramar	San Carlos	14.721700	-91.821950
21	San Marcos	La Reforma	Villa Hermosa	Casco de Finca	14.773300	-91.826183
22	San Marcos	Tajumulco	Navidad	Totaná	15.007461	-96.084514
23	Quetzaltenango	Colomba, Costa Cuca	Vizcaya	Robusta	14.754800	-91.773833
24	San Marcos	El Tumbador	El Faro	Lote 401	14.888883	-91.918306
25	San Marcos	El Tumbador	El Faro	Buena Vista 502	14.888883	-91.918306

Tabla 25. Información de suelos de Región II

No.	Departamento	Localidad	Finca	Lote	Latitud	Longitud
1	Chimaltenango	Pochuta	Barberena	Buena Vista	14.546949	-91.076660
2	Chimaltenango	Pochuta	La Florida	Ojo de Agua	14.529252	-91.090736
3	Suchitepéquez	San Pablo Jocopilas	ECA Ladrillera	La Tolva	14.599199	-91.430583
4	Suchitepéquez	Chicacao	La Fortuna	Fortuna 2010	14.547281	-91.336899
5	Suchitepéquez	Chicacao	La Libertad	La Libertad 2009/10	14.533282	-91.326513
6	Suchitepéquez	Chicacao	El Jardín	Santa Teresa Tomás Chiquival	14.545453	-91.315227
7	Quetzaltenango	El Palmar	Rosario Palajunoj	Lote 1	14.657582	-91.544867
8	Suchitepéquez	Zunilito	Santa Anita	Nevada	14.600362	-91.501265
9	Suchitepéquez	San Francisco Zapotitlán	Providencia	Lote 4	14.603934	-91.534138
10	Retalhuleu	San Felipe	Hamburgo	Lote 1 Agrícola	14.610910	-91.567183
11	Suchitepéquez	Pueblo Nuevo	Colombia	Lote 2 Colombia	14.643133	-91.528172
12	Suchitepéquez	Patulul	Los Trrales	La Isla	14.406833	-91.150560
13	Suchitepéquez	Santa Bárbara	Moca Grande	Verónica 1	14.443990	-91.233730
14	Suchitepéquez	Patulul	El Horizonte	El Plan	14.423874	-91.145153
15	Suchitepéquez	Santa Bárbara	Mi Tierra	Lote 2010	14.424622	-91.228323
16	Suchitepéquez	Patulul	San Jerónimo Miram	Santa Anita, 90 94 95	14.409742	-91.135798
17	Suchitepéquez	Santa Bárbara	Mi Tierra	Andes	14.439834	-91.213346
18	Sololá	Santiago Atitlán	Chemuc	Muestra única	14.631465	-91.227508
19	Sololá	San Lucas Tolimán	San Lucas Tolimán	Muestra única	14.629971	-91.135540
20	Sololá	San Pedro La Laguna	Xepacoral	Muestra única	14.685730	-91.269007

Tabla 26. Información de suelos de Región III

No.	Departamento	Localidad	Finca	Lote	Latitud	Longitud
1	Sacatepéquez	San Miguel Dueñas	San Rafael Urias	El Sacabastal No. 1	14.523183	-90.787767
2	Sacatepéquez	Ciudad Vieja	Bella Vista	El Tablón Lote No. 7	14.531967	-90.743767
3	Sacatepéquez	Antigua Guatemala	La Follie	El Tablón El Aguacatal	14.574433	-90.730967
4	Sacatepéquez	Jocotenango	Buena Vista	Bella Vista	14.587133	-90.744183
5	Chimaltenango	San Martín Jilotepeque	San Martín	El Tabón El Sapito	14.878500	-90.801000
6	Chimaltenango	San Martín Jilotepeque	Santa Elena	La Estancia de San Martín	14.890167	-90.746217
7	Chimaltenango	Acatenango	El Platanar	Muestra No. 3	14.557017	-90.937517
8	Chimaltenango	Acatenango	El Líbano	Muestra No. 4	14.549050	-90.943233
9	Escuintla	San Vicente Pacaya	Las Estacas	Muestra No. 6	14.420467	-90.612617
10	Chimaltenango	Yepocapa	La Conchita	Muestra No. 5	14.474233	-90.969033
11	Guatemala	Amatitlán	El Rincón	Lote El Rincón No. 1	14.450467	-90.520817
12	Guatemala	Santa Elena Barillas	El Retumbo	El Tablón Ania 2	14.324767	-90.596333
13	Guatemala	Santa Elena Barillas	Las Cachajinas	El Tablón La Casa	14.349950	-90.571450

Tabla 27. Información de suelos de Región IV

No.	Departamento	Localidad	Finca	Lote	Latitud	Longitud
1	Santa Rosa	Pueblo Nuevo Viñas	El Amate	Beneficio 1	14.166833	-90.483350
2	Santa Rosa	Pueblo Nuevo Viñas	El Amate	Beneficio 2	14.158833	-90.466667
3	Santa Rosa	Nueva Santa Rosa	La Oriental	El Limonar 1	14.386789	-90.284597
4	Santa Rosa	Nueva Santa Rosa	La Oriental	El Limonar 2	14.386789	-90.284597
5	Santa Rosa	Cuilapa	La Ceiba	Cumbre Alta	14.237333	-90.241400
6	Santa Rosa	Cuilapa	La Ceiba	Pino Seco	14.240450	-90.234878
7	Santa Rosa	Cuilapa	La Ceiba	Pozo Alto	14.245667	-90.234455
8	Santa Rosa	Barberena	La Castellana	El Mirador	14.306083	-90.344767
9	Santa Rosa	Barberena	Santa Ileana	Sector 2	14.256083	-90.344767
10	Santa Rosa	Barberena	Las Flores	La Entrada	14.300367	-90.362633
11	Santa Rosa	Barberena	Las Flores	El Bajío	14.299583	-90.365233
12	Santa Rosa	Barberena	La Castellana	Guardianilla	14.315600	-90.345033
13	Santa Rosa	Pueblo Nuevo Viñas	La Vega	Plantilla Santa Isabel	14.345500	-90.454733
14	Santa Rosa	Barberena	El Hato	El Colador 1	14.296400	-90.362900
15	Santa Rosa	Pueblo Nuevo Viñas	El Retiro	Tablón El Guayabo	14.173100	-90.417417
16	Santa Rosa	Nueva Santa Rosa	El Zapote	Tablón Los Llanos 95	14.319450	-90.308983

Tabla 28. Información de suelos de Región V

No.	Departamento	Localidad	Finca	Lote	Latitud	Longitud
1	Huehuetenango	San Pedro Necta	El Limonar	Ojo de Agua	15.553783	-91.800517
2	Huehuetenango	Michicoy, San Pedro Necta	Los Pinos	Los Naranjales	15.556750	-91.776967
3	Huehuetenango	Michicoy, San Pedro Necta	Los Pinos	Los Pinos	15.552600	-91.781267
4	Huehuetenango	El Pajal, San Antonio Huista	Las Penhas	Las Penhas	15.646933	-91.842033
5	Huehuetenango	Michicoy, San Pedro Necta	Los Pinos	Ojo de Agua	15.554900	-91.779167
6	Huehuetenango	La Democracia	El Zapote	El Limar	15.652933	-91.916717
7	Huehuetenango	La Democracia	San Fernando Huixoc	Las Ochenta	15.573800	-91.816300
8	Huehuetenango	Barillas	La Severa	La Plantilla	15.816616	-91.324883
9	Quiché	Sotzil, Chajul	Xecatzé	Zotzil I	15.484618	-91.043873
10	Huehuetenango	La Democracia	Buenos Aires	El Cementerio	15.565633	-91.815717
11	Huehuetenango	La Democracia	El Zapote	Las Palmas	15.653333	-91.918067
12	Huehuetenango	La Democracia	Huixoc	Mundo Novo	15.554650	-91.807283
13	Quiché	Sotzil, Chajul	Xesiban	Lote 1	15.474196	-91.029110
14	Huehuetenango	Barillas	San Rafael	La Entrada	15.792336	-91.304798
15	Huehuetenango	La Democracia	Santa Rosa Buenos Aires	Ojo de Agua	15.617967	-91.953233
16	Huehuetenango	La Libertad	La Bendición	El Centro	15.519356	-91.866817
17	Huehuetenango	Palmira Nueva, La Libertad	Vista Hermosa	El Plan	15.603776	-91.759100
18	Huehuetenango	Palmira Nueva, La Libertad	Vista Hermosa	El Bordo	15.600470	-91.770000
19	Huehuetenango	Palmira Nueva, La Libertad	Vista Hermosa	La Joya	15.602826	-91.753950
20	Huehuetenango	La Laguna Ixmal, San Antonio Huista	Los Tayares	Las Noventa	15.612373	-91.790857
21	Huehuetenango	La Laguna Ixmal, San Antonio Huista	Los Tayares	Las Sesenta	15.614192	-91.793947
22	Huehuetenango	El Pajal	Chalún, Limonar	Parcela Central	15.627914	-91.807423
23	Huehuetenango	Cuilco	Agua Dulce	Reforma Alto	15.408010	-91.950717
24	Huehuetenango	La Democracia	El Amate	El Amate	15.629154	-91.877289
25	Huehuetenango	El Pajal	La Montañita	Muestra Única	15.637502	-91.823130
26	Huehuetenango	La Democracia	El Tránsito	Beneficio Bajo	15.592533	-91.872568
27	Huehuetenango	La Libertad	Los Álamos	Los Álamos	15.502980	-91.880207
28	Huehuetenango	La Democracia	Los Nogales	Los Nogales	15.641717	-91.898746
29	Huehuetenango	Huehuetenango	Peña Blanca	Los Laureles	15.505296	-91.904411
30	Huehuetenango	Huehuetenango	El Almacigal	El Almacigal	15.552930	-91.720734
31	Huehuetenango	Huehuetenango	La Secadora	La Secadora	15.645850	-91.743050
32	Huehuetenango	La Democracia	El Zapote	El Limar	15.654693	-91.915913
33	Huehuetenango	Huehuetenango	El Patio	El Patio	15.293458	-91.447449
34	Huehuetenango	Huehuetenango	El Patio	No. 96	15.283523	-91.455688

Tabla 29. Información de suelos de Región VI

No.	Departamento	Localidad	Finca	Lote	Latitud	Longitud
1	Alta Verapaz	San Cristóbal Verapaz	Bella Vista	Bosque 2011	15.358811	-90.493956
2	Alta Verapaz	San Cristóbal Verapaz	Santa Inés Chicar	Lote 4	15.373005	-90.491209
3	Alta Verapaz	Cobán	Coop Chicoj R. L.	Juan	15.443256	-90.405293
4	Alta Verapaz	San Cristóbal Verapaz	San Joaquín	Horno Minas	15.369115	-90.501509
5	Alta Verapaz	San Cristóbal Verapaz	El Capuccino	Sector 4	15.376895	-90.477476
6	Alta Verapaz	San Cristóbal Verapaz	Yaxbatz	Parcela 10	15.351155	-90.480652
7	Alta Verapaz	San Pedro Carchá	Chapultepec	La Colindancia	15.479076	-90.293798
8	Alta Verapaz	Panzós	El Porvenir	Lote 1	15.417029	-89.625006
9	Alta Verapaz	San Miguel Tucurú	Nueva Aurora	Chacalte	15.295528	-90.124583
10	Alta Verapaz	Cahabón	Chajbelén	Tucán	15.600842	-89.810486
11	Alta Verapaz	Lanquín	Chimelb	Lote 5	15.570707	-89.982104
12	Alta Verapaz	Senahú	Sepanahú	Lote 98	15.413636	-89.815764
13	Alta Verapaz	Senahú	Sencansín	El Chispal	15.414629	-89.825935
14	Alta Verapaz	Lanquín	Sepacay	Lote 5 Tekisic	15.567689	-89.977512
15	Baja Verapaz	San Jerónimo	El Castaño	El Cujal	15.066239	-90.240970
16	Baja Verapaz	San Jerónimo	La Granja	Lote 1	15.044689	-90.232430
17	Baja Verapaz	San Jerónimo	El Jocotillo	Lote 1	15.065825	-90.219212
18	Baja Verapaz	San Jerónimo	El Cerrón	Lote 1	15.045104	-90.253029
19	Baja Verapaz	San Jerónimo	El Chalum	Lote 1	15.042866	-90.225048

Tabla 30. Información de suelos de Región VII

No.	Departamento	Localidad	Finca	Lote	Latitud	Longitud
1	Zacapa	La Unión	Rony	Rony	14.958633	-89.298763
2	Zacapa	La Unión	La Providencia	La Faldona	14.978285	-89.292154
3	Zacapa	Gualán	El Pino	Lote 5	15.111446	-89.352021
4	Chiquimula	Esquipulas	Donde Nace El Agua	El Guanabo	14.590561	-89.336700
5	Chiquimula	El Zapotalito, Esquipulas	Vista Hermosa	Vista Hermosa	14.586408	-89.310608
6	Chiquimula	Esquipulas	La Molienda	La Molienda	14.593219	-89.347858
7	Zacapa	La Unión	Nueva Esperanza	Lote 1, 2 y 3	14.962696	-89.279280
8	Zacapa	La Unión	El Chorro	La Waxa y El Chagiüte	14.984503	-89.296188
9	Zacapa	La Unión	Ebenezer	Lo De Sergio y El Sanjón	14.956560	-89.302197
10	Zacapa	La Unión	Los Cipreses	La Plantillona, El Beneficio Y La Montaña	14.988732	-89.280567
11	Chiquimula	Olopa	Guayabo	Guayabo	14.617139	-89.230957
12	Chiquimula	Carrizal	Carrizal	Carrizal	14.640725	-89.176369
13	Chiquimula	Olopa	Talquezal	Talquezal	14.615478	-89.131222
14	Chiquimula	Olopa	El Cerrón	El Cerrón	14.566637	-89.192848
15	Chiquimula	Quezaltepeque	Nochán	Nochán	14.621209	-89.436178
16	Chiquimula	Chiquimula	La Cuestona	Lote 1	14.839109	-89.525700
17	Chiquimula	Chiquimula	La Cuestona	Lote 2	14.835127	-89.534969
18	Chiquimula	Chiquimula	La Cuestona	Lote 3	14.823677	-89.537029
19	Chiquimula	Chiquimula	Alotepeque	Lote 1	14.782020	-89.560547
20	Chiquimula	Chiquimula	Alotepeque	Lote 2	14.774053	-89.555998
21	Chiquimula	Quezaltepeque	El Chile	El Chile	14.649777	-89.447250
22	Chiquimula	Quezaltepeque	El Pino	El Pino	14.634247	-89.426823
23	Chiquimula	Quezaltepeque	Asodeflor	Asodeflor	14.639562	-89.456005

F. Datos obtenidos

1. Análisis de muestras por método de intercambio iónico

Tabla 31. Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región I

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
1	6 Septiembre 2011	1	11.911	6.282	7.636	3.83
	6 Septiembre 2011	2	12.943	6.029	8.042	3.84
	9 Septiembre 2011	3	10.821	4.949	6.25	3.24
	9 Septiembre 2011	4	10.123	5.055	6.07	2.94
2	6 Septiembre 2011	1	32.423	4.974	16.9	5.27
	6 Septiembre 2011	2	24.337	4.705	15.56	5.02
	9 Septiembre 2011	3	22.788	3.874	16.51	4.41
	9 Septiembre 2011	4	25.792	3.686	16.06	4.19
3	6 Septiembre 2011	1	14.292	2.798	17.96	4.27
	6 Septiembre 2011	2	13.917	2.834	16.6	4.06
	9 Septiembre 2011	3	12.714	2.247	16.27	3.68
	9 Septiembre 2011	4	15.577	2.278	15.81	3.56
4	6 Septiembre 2011	1	18.601	3.107	22.71	7.68
	6 Septiembre 2011	2	18.539	2.735	25.6	7.68
	9 Septiembre 2011	3	16.552	2.438	20.3	6.24
	9 Septiembre 2011	4	15.1	2.32	21.46	7.47
5	6 Septiembre 2011	1	31.16	2.561	11.51	5.22
	6 Septiembre 2011	2	38.722	2.532	13.38	5.62
	9 Septiembre 2011	3	32.894	1.937	11.3	4.81
	9 Septiembre 2011	4	38.52	2.636	12.37	4.97
6	6 Septiembre 2011	1	64.542	1.523	21.95	3.68
	6 Septiembre 2011	2	-	1.364	17.09	3.81
	9 Septiembre 2011	3	61.38	1.584	17.15	3.47
	9 Septiembre 2011	4	66.113	1.615	16.94	2.86
7	6 Septiembre 2011	1	14.047	5.739	6.87	3.14
	6 Septiembre 2011	2	15.329	5.385	-	2.97
	9 Septiembre 2011	3	15.396	4.141	6.9	2.47
	9 Septiembre 2011	4	16.301	4.994	7.49	2.54
8	6 Septiembre 2011	1	6.0437	2.951	13.07	4.97
	6 Septiembre 2011	2	5.9741	3.169	13.1	4.6
	9 Septiembre 2011	3	5.4362	2.891	10.77	3.96
	9 Septiembre 2011	4	4.6576	2.342	13.94	3.83

Tabla 32. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región I

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
9	6 Septiembre 2011	1	35.8	8.086	6.54	6.22
	6 Septiembre 2011	2	35.455	7.85	6.42	4.42
	9 Septiembre 2011	3	39.436	6.772	6.77	5.21
	9 Septiembre 2011	4	37.882	6.028	7.74	5.35
10	6 Septiembre 2011	1	11.194	3.832	14.26	5.96
	6 Septiembre 2011	2	11.031	3.704	13.54	5.86
	9 Septiembre 2011	3	9.1926	2.985	15.6	5.23
	9 Septiembre 2011	4	8.7352	3.739	14.74	5
11	6 Septiembre 2011	1	14.595	1.459	10.48	4.79
	6 Septiembre 2011	2	17.924	1.529	10.32	5.27
	9 Septiembre 2011	3	15.201	1.656	12.22	4.21
	9 Septiembre 2011	4	13.239	1.796	-	5.16
12	6 Septiembre 2011	1	-	1.182	-	2.45
	6 Septiembre 2011	2	125.436	1.107	28.44	2.63
	9 Septiembre 2011	3	127.552	1.42	21.83	2.19
	9 Septiembre 2011	4	125.414	1.432	27.76	2.42
13	6 Septiembre 2011	1	8.9054	3.089	18.76	7
	6 Septiembre 2011	2	10.709	3.128	17.15	7.23
	9 Septiembre 2011	3	12.369	2.838	20.63	5.99
	9 Septiembre 2011	4	12.548	2.609	18.59	6.85
14	6 Septiembre 2011	1	13.525	1.164	8.52	3.69
	6 Septiembre 2011	2	10.466	1.228	8.25	3.95
	9 Septiembre 2011	3	-	1.31	-	3.32
	9 Septiembre 2011	4	10.675	1.263	8.89	3.9
15	6 Septiembre 2011	1	25.274	2.79	20.46	6.72
	6 Septiembre 2011	2	33.676	2.97	21.68	7.15
	9 Septiembre 2011	3	26.724	2.917	19.58	6
	9 Septiembre 2011	4	32.003	2.806	20.43	5.69
16	6 Septiembre 2011	1	35.899	3.068	-	4.02
	6 Septiembre 2011	2	33.462	3.267	6.41	3.63
	9 Septiembre 2011	3	30.546	2.676	7.24	4.34
	9 Septiembre 2011	4	32.47	2.722	8.37	3.04

Tabla 33. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región I

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
17	6 Septiembre 2011	1	50.175	7.138	25.17	8.46
	6 Septiembre 2011	2	52.822	8.585	28.7	7.89
	9 Septiembre 2011	3	46.648	6.028	25.29	6.64
	9 Septiembre 2011	4	55.965	7.046	25.07	7.73
18	6 Septiembre 2011	1	15.7088	3.059	2.74	1.91
	6 Septiembre 2011	2	16.1699	3.352	2.73	2.16
	9 Septiembre 2011	3	20.679	3.296	3.56	1.72
	9 Septiembre 2011	4	18.797	3.206	2.96	1.71
19	6 Septiembre 2011	1	9.8973	2.134	3.52	2.62
	6 Septiembre 2011	2	8.0289	2.208	3.66	2.29
	9 Septiembre 2011	3	10.072	2.097	4.06	2.32
	9 Septiembre 2011	4	11.557	2.167	4.59	2.31
20	6 Septiembre 2011	1	55.787	2.764	23.12	2.764
	6 Septiembre 2011	2	62.817	2.87	21.87	3.245
	9 Septiembre 2011	3	55.794	2.474	17.43	2.956
	9 Septiembre 2011	4	58.111	2.518	19.85	2.82
21	6 Septiembre 2011	1	101.744	1.76	31.53	9.174
	6 Septiembre 2011	2	97.158	1.782	33.65	8.296
	9 Septiembre 2011	3	-	2.039	29.11	8.09
	9 Septiembre 2011	4	91.656	2.001	25.75	8.09
22	6 Septiembre 2011	1	8.2769	2.381	10.77	4.07
	6 Septiembre 2011	2	6.6877	2.465	10.47	3.89
	9 Septiembre 2011	3	9.338	2.452	12.38	3.76
	9 Septiembre 2011	4	10.909	2.619	11.66	2.94
23	6 Septiembre 2011	1	60.806	4.468	22.29	7.966
	6 Septiembre 2011	2	61.036	4.597	23.57	8.186
	9 Septiembre 2011	3	57.845	4.061	20.16	7.511
	9 Septiembre 2011	4	67.602	3.663	24.71	6.528
24	6 Septiembre 2011	1	21.402	2.155	3.04	2.64
	6 Septiembre 2011	2	23.4	2.291	3.21	2.63
	9 Septiembre 2011	3	30.505	2.288	3.76	2.93
	9 Septiembre 2011	4	23.207	2.268	4.06	2.95
25	6 Septiembre 2011	1	14.651	2.282	2.79	2.51
	6 Septiembre 2011	2	15.778	2.45	2.54	2.75
	9 Septiembre 2011	3	13.637	2.166	3.29	2.33
	9 Septiembre 2011	4	18.02	2.302	3.33	2.36

Tabla 34. Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región II

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
1	4 Agosto 2011	1	3.0573	2.925	16.49	5.111
	4 Agosto 2011	2	3.0452	2.927	15.84	5.525
	4 Agosto 2011	3	3.1199	3.217	18.78	6.11
	9 Agosto 2011	4	4.5073	3.19	20.97	5.91
	9 Agosto 2011	5	5.1981	3.4	21.52	5.3
	9 Agosto 2011	6	-	-	22	5.6
2	4 Agosto 2011	1	58.49	3.466	31.48	5.696
	4 Agosto 2011	2	63.022	3.186	27.48	4.747
	4 Agosto 2011	3	58.524	2.946	29.49	4.978
	9 Agosto 2011	4	53.13	3.65	32.43	5.72
	9 Agosto 2011	5	51.49	3.65	31.43	5.51
	9 Agosto 2011	6	58.21	-	32.44	6.47
3	4 Agosto 2011	1	-	6.604	32.54	5.749
	4 Agosto 2011	2	6.5033	6.626	34.28	5.84
	4 Agosto 2011	3	5.4552	6.44	30.51	5.381
	9 Agosto 2011	4	8.46	7.19	33.95	5.99
	9 Agosto 2011	5	-	7	33.03	6.5
	9 Agosto 2011	6	6.64	-	34.04	5.97
4	4 Agosto 2011	1	8.3935	5.841	24.26	4.625
	4 Agosto 2011	2	-	5.465	20.97	4.38
	4 Agosto 2011	3	6.1269	5.939	23.84	4.769
	9 Agosto 2011	4	10.17	6.72	26.54	4.98
	9 Agosto 2011	5	9.65	6.42	26.85	4.64
	9 Agosto 2011	6	9.03	-	24.44	4.31
5	4 Agosto 2011	1	4.3343	5.978	34.22	5.189
	4 Agosto 2011	2	5.8215	6.789	32.37	4.922
	4 Agosto 2011	3	4.7151	6.203	33.14	4.797
	9 Agosto 2011	4	7.26	6.24	36.68	5.44
	9 Agosto 2011	5	6.47	6.02	33.21	4.47
	9 Agosto 2011	6	6.52	6.53	36.47	4.9
6	4 Agosto 2011	1	28.746	3.577	18.17	3.376
	4 Agosto 2011	2	31.208	3.836	20.81	3.631
	4 Agosto 2011	3	28.756	3.613	20.66	3.47
	9 Agosto 2011	4	22.99	3.05	18.44	3.31
	9 Agosto 2011	5	28.44	3.78	15.27	3.62
	9 Agosto 2011	6	33.05	3.836	-	-

Tabla 35. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región II

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
7	12 Agosto 2011	1	185.505	2.36	36.73	13.95
	12 Agosto 2011	2	205.29	2.17	38.58	12.24
	12 Agosto 2011	3	215.6	2.157	35.04	13.06
	18 Agosto 2011	4	199.69	2.36	25.69	12.06
	18 Agosto 2011	5	193.46	2.17	30.44	14.51
	18 Agosto 2011	6	-	2.02	35.15	12.23
8	12 Agosto 2011	1	2.323	0.672	12.37	2.438
	12 Agosto 2011	2	2.1672	0.594	11.39	2.618
	12 Agosto 2011	3	-	0.621	10.22	2.467
	18 Agosto 2011	4	2.8759	-	14.71	2.263
	18 Agosto 2011	5	3.8784	0.515	13.05	1.892
	18 Agosto 2011	6	2.7793	0.595	-	1.927
9	12 Agosto 2011	1	22.347	1.61	2.105	1.62
	12 Agosto 2011	2	24.895	1.64	2.039	-
	12 Agosto 2011	3	26.118	1.72	2.174	1.37
	18 Agosto 2011	4	22.472	-	2.437	1.83
	18 Agosto 2011	5	24.833	-	2.414	1.74
	18 Agosto 2011	6	29.702	-	-	1.98
10	12 Agosto 2011	1	63.354	4.011	13.28	3.93
	12 Agosto 2011	2	69.767	4.79	13.11	4.34
	12 Agosto 2011	3	-	4.75	13.62	3.22
	18 Agosto 2011	4	60.72	-	10.94	4.58
	18 Agosto 2011	5	58.761	-	12.55	4.52
	18 Agosto 2011	6	58.679	-	12.31	-
11	12 Agosto 2011	1	50.833	6.6	10.83	4.4
	12 Agosto 2011	2	52.91	6.34	8.01	3.99
	12 Agosto 2011	3	46.495	6.71	10.43	4.2
	18 Agosto 2011	4	41.894	-	9.456	4.63
	18 Agosto 2011	5	-	-	7.682	5.74
	18 Agosto 2011	6	-	-	8.868	5.03
12	12 Agosto 2011	1	16.104	1.21	20.3	5.08
	12 Agosto 2011	2	23.148	1.13	23.61	6.13
	12 Agosto 2011	3	17.904	1.18	22.32	5.24
	18 Agosto 2011	4	17.478	-	20.89	6.92
	18 Agosto 2011	5	14.026	-	19.67	6.84
	18 Agosto 2011	6	19.476	-	19.62	6.62

Tabla 36. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región II

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
13	12 Agosto 2011	1	11.59	0.52	12.46	6.483
	12 Agosto 2011	2	9.4077	0.46	10.82	4.912
	12 Agosto 2011	3	8.7326	0.56	11.24	5.529
	18 Agosto 2011	4	9.2903	0.525	13.46	7.332
	18 Agosto 2011	5	10.954	0.469	14.46	6.928
	18 Agosto 2011	6	11.073	-	-	6.187
14	12 Agosto 2011	1	30.705	8.05	32.56	13.39
	12 Agosto 2011	2	28.02	7.69	31.16	12.25
	12 Agosto 2011	3	28.509	7.45	31.73	12.03
	18 Agosto 2011	4	25.657	-	29.74	15.2
	18 Agosto 2011	5	30.234	-	32.76	14.7
	18 Agosto 2011	6	26.353	-	32.36	14.21
15	12 Agosto 2011	1	7.416	9.24	13.89	2.38
	12 Agosto 2011	2	7.6285	9.26	12.65	2.67
	12 Agosto 2011	3	5.171	9.15	13.98	2.41
	18 Agosto 2011	4	5.7887	-	11.93	2.62
	18 Agosto 2011	5	5.8416	-	10.35	2.93
	18 Agosto 2011	6	5.5536	-	10.33	-
16	12 Agosto 2011	1	25.601	2.61	17.24	4.46
	12 Agosto 2011	2	28.617	2.59	20.48	4.78
	12 Agosto 2011	3	27.211	2.83	17.22	4.11
	18 Agosto 2011	4	28.75	-	20	5.25
	18 Agosto 2011	5	26.337	-	18.49	5.15
	18 Agosto 2011	6	27.383	-	19.71	4.3
17	12 Agosto 2011	1	5.7548	8.1	12.31	3.91
	12 Agosto 2011	2	-	7.92	13.38	3.65
	12 Agosto 2011	3	6.9653	8.08	15.12	3.81
	18 Agosto 2011	4	6.7494	-	11.47	4.75
	18 Agosto 2011	5	6.7548	-	12.23	4.77
	18 Agosto 2011	6	6.7694	-	10.4	4.86
18	25 Agosto 2011	1	38.914	-	27.33	4.03
	25 Agosto 2011	2	38.146	-	29.44	4.45
	25 Agosto 2011	3	34.814	-	27.64	4.2
	31 Agosto 2011	4	32.8155	3.13	26.34	4.24
	31 Agosto 2011	5	36.163	2.95	28.13	4.47
	31 Agosto 2011	6	35.286	2.99	28.07	4.27

Tabla 37. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región II

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
19	25 Agosto 2011	1	32.544	-	42.84	8.95
	25 Agosto 2011	2	34.751	-	43.04	9.34
	25 Agosto 2011	3	29.6	-	44.06	9.67
	31 Agosto 2011	4	28.255	7.27	49.93	10.25
	31 Agosto 2011	5	27.509	7.13	43.4	10.43
	31 Agosto 2011	6	29.312	7.19	43.27	11.06
20	25 Agosto 2011	1	52.3	-	43.66	9.32
	25 Agosto 2011	2	59.91	-	45.27	9.17
	25 Agosto 2011	3	54.49	-	44.26	8.67
	31 Agosto 2011	4	60.08	3.36	45.79	9.03
	31 Agosto 2011	5	51.067	3.04	49.66	10.31
	31 Agosto 2011	6	-	2.98	47.68	10.41

Tabla 38. Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región III

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
1	28 Septiembre 2011	1	43.01	5.26	52.97	14.49
	28 Septiembre 2011	2	42.83	5.27	56.12	14.78
	30 Septiembre 2011	3	32.991	6.75	55.13	15.1
	30 Septiembre 2011	4	31.506	6.3	52.06	15.16
2	28 Septiembre 2011	1	135.12	3.73	30.58	9.22
	28 Septiembre 2011	2	116.91	3.73	28.21	9.27
	30 Septiembre 2011	3	92.889	4.99	29.38	10.65
	30 Septiembre 2011	4	95.97	4.43	31.48	11.13
3	28 Septiembre 2011	1	175.92	7	82.87	20.49
	28 Septiembre 2011	2	152	7.32	87.13	22.01
	30 Septiembre 2011	3	140.796	8.78	96.94	22.42
	30 Septiembre 2011	4	145.452	7.83	82.79	20.59
4	28 Septiembre 2011	1	31.446	7.94	53.45	21.19
	28 Septiembre 2011	2	30.33	8.9	52.44	21.19
	30 Septiembre 2011	3	25.477	9.44	45.38	19.1
	30 Septiembre 2011	4	23.826	10.51	54.23	21
5	28 Septiembre 2011	1	12.407	7.521	34.65	12.05
	28 Septiembre 2011	2	14.269	7.873	31.13	11.51
	30 Septiembre 2011	3	15.771	7.56	31.57	13.1
	30 Septiembre 2011	4	18.143	7.58	31.4	11.47
6	28 Septiembre 2011	1	38.85	5.77	45.28	16.41
	28 Septiembre 2011	2	43.95	5.94	42.67	16.3
	30 Septiembre 2011	3	32.712	7.39	35.9	13.65
	30 Septiembre 2011	4	33.591	7.35	39.41	14.38
7	28 Septiembre 2011	1	69.25	2.88	34.1	8.028
	28 Septiembre 2011	2	66.95	2.6	32.95	8.14
	30 Septiembre 2011	3	54.853	3.44	28.78	7.67
	30 Septiembre 2011	4	53.475	3.27	33.25	8.54
8	28 Septiembre 2011	1	42.22	1.35	40.17	8.14
	28 Septiembre 2011	2	41.37	1.51	43.03	8.31
	30 Septiembre 2011	3	39.27	1.81	42.41	9.49
	30 Septiembre 2011	4	32.83	1.8	41.5	9.25

Tabla 39. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región III

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
9	28 Septiembre 2011	1	12.987	3.32	41.18	7.79
	28 Septiembre 2011	2	11.676	4.297	38.08	6.63
	30 Septiembre 2011	3	11.828	4.43	38.52	7.93
	30 Septiembre 2011	4	10.111	3.63	37.65	7.416
10	28 Septiembre 2011	1	33.22	0.998	18.84	4.042
	28 Septiembre 2011	2	33.65	1.021	19.99	4.017
	30 Septiembre 2011	3	26.491	1.14	18.82	4.85
	30 Septiembre 2011	4	28.71	1.17	19.68	4.044
11	28 Septiembre 2011	1	130.56	5.885	37.36	10.31
	28 Septiembre 2011	2	126.42	5.817	35.62	10.69
	30 Septiembre 2011	3	131.46	5.49	37.42	9.87
	30 Septiembre 2011	4	127.48	5.35	37.98	10.88
12	28 Septiembre 2011	1	27.2	4.29	41.3	11.67
	28 Septiembre 2011	2	30.35	4.03	33.35	11.34
	30 Septiembre 2011	3	24.17	5.05	37.84	11.85
	30 Septiembre 2011	4	21.3	5.46	39.46	12.99
13	28 Septiembre 2011	1	16.951	5.654	43.37	8.261
	28 Septiembre 2011	2	18.807	5.748	44.89	7.512
	30 Septiembre 2011	3	18.323	5.37	43.59	8.83
	30 Septiembre 2011	4	16.124	5.47	47.56	7.407

Tabla 40. Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región IV

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
1	29 Julio 2011	1	116.212	6.72	52.91	19.13
	29 Julio 2011	2	122.16	6.45	57.59	15.81
	29 Julio 2011	3	-	6.816	59.72	17.33
	2 Agosto 2011	4	125.582	7.14	44.41	15.72
	2 Agosto 2011	5	131.398	7.06	44.88	17.04
	2 Agosto 2011	6	133.992	6.66	42.29	-
2	29 Julio 2011	1	122.34	6.62	122.7	27.26
	29 Julio 2011	2	-	5.87	113	25.17
	29 Julio 2011	3	-	5.76	115.3	24.01
	2 Agosto 2011	4	129.236	5.67	101.7	21.34
	2 Agosto 2011	5	138.326	5.77	91.63	21.01
	2 Agosto 2011	6	141.04	5.82	87.75	19.91
3	29 Julio 2011	1	67.25	4.49	52.81	11.19
	29 Julio 2011	2	69.76	4.84	50.5	12.41
	29 Julio 2011	3	-	4.62	47.26	12.08
	2 Agosto 2011	4	59.905	4.74	46.3	12.22
	2 Agosto 2011	5	60.8	4.32	46.43	10.82
	2 Agosto 2011	6	60.2	4.38	47.02	10.61
4	29 Julio 2011	1	34.925	7.1	52.56	17.25
	29 Julio 2011	2	36.35	7.29	51.64	16.42
	29 Julio 2011	3	35.485	7.82	52.59	19
	2 Agosto 2011	4	39.405	6.65	40.97	14.68
	2 Agosto 2011	5	40.59	7.16	46.21	15.38
	2 Agosto 2011	6	41.1	6.89	54.81	17.74
5	29 Julio 2011	1	10.5	5.62	20.94	7.18
	29 Julio 2011	2	9.31	5.35	23.39	6.86
	29 Julio 2011	3	7.61	5.59	22.67	7.32
	2 Agosto 2011	4	6.34	5.09	19.93	5.96
	2 Agosto 2011	5	8.54	5.64	21.85	6.39
	2 Agosto 2011	6	9.36	5.85	22.41	7.37
6	29 Julio 2011	1	8.84	4.36	24.15	10
	29 Julio 2011	2	12.72	4.69	27.12	11.26
	29 Julio 2011	3	9.48	4	26.73	9.97
	2 Agosto 2011	4	9.63	4.52	25.13	9.06
	2 Agosto 2011	5	10.08	4.27	23.73	8.47
	2 Agosto 2011	6	10.19	4.46	25.13	8.68

Tabla 41. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región IV

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
7	29 Julio 2011	1	16.31	4.71	33.09	10.72
	29 Julio 2011	2	16.85	4.66	31.11	10.16
	29 Julio 2011	3	15.77	5.45	35.78	11.43
	2 Agosto 2011	4	18.14	5.17	36.71	11.4
	2 Agosto 2011	5	15.01	5.13	32.77	10.14
	2 Agosto 2011	6	18.74	5.49	31.12	9.58
8	29 Julio 2011	1	7.49	1.29	21.49	8.69
	29 Julio 2011	2	7.76	1.41	27.54	10.23
	29 Julio 2011	3	7.03	1.2	21.6	8.7
	2 Agosto 2011	4	6.82	1.66	24.6	9.63
	2 Agosto 2011	5	8.43	1.33	-	7.19
	2 Agosto 2011	6	8.2	1.5	23.54	9.43
9	29 Julio 2011	1	22.02	11.14	23.96	13.88
	29 Julio 2011	2	27.15	11.04	22.55	12.17
	29 Julio 2011	3	24.49	11.06	22.46	11.12
	2 Agosto 2011	4	32.23	10.78	18.23	13.98
	2 Agosto 2011	5	23.97	11.06	18.56	12.84
	2 Agosto 2011	6	30.32	11.17	19.82	11.94
10	29 Julio 2011	1	39.9	7.22	70.2	23.42
	29 Julio 2011	2	42.28	7.01	73.55	23.9
	29 Julio 2011	3	40.68	8.41	73.17	23.23
	2 Agosto 2011	4	46.04	7.98	67.45	21.91
	2 Agosto 2011	5	43.51	6.52	57.31	18.75
	2 Agosto 2011	6	46.21	7.22	69.34	22.58
11	29 Julio 2011	1	21.25	2.92	96.17	36.97
	29 Julio 2011	2	18.04	3.28	97.19	34.89
	29 Julio 2011	3	17.09	3.16	90.54	34.48
	2 Agosto 2011	4	15.41	3.35	73.82	35.5
	2 Agosto 2011	5	14.58	3.44	72.02	37.38
	2 Agosto 2011	6	15.85	2.81	-	35.72
12	29 Julio 2011	1	-	2.26	18.71	8.96
	29 Julio 2011	2	8.39	1.9	17.02	8.96
	29 Julio 2011	3	6.53	1.85	19.14	9.48
	2 Agosto 2011	4	7.07	1.77	18.53	7.84
	2 Agosto 2011	5	6.6	1.8	17.23	7.06
	2 Agosto 2011	6	6.38	1.75	16.76	6.48

Tabla 42. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región IV

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
13	28 Septiembre 2011	1	11.788	5.124	42.54	13.48
	28 Septiembre 2011	2	11.315	5.843	45.87	14.58
	30 Septiembre 2011	3	10.567	5.672	46.24	14.28
	30 Septiembre 2011	4	13.871	5.081	48.19	12.48
14	28 Septiembre 2011	1	255.543	4.098	354.2	53.76
	28 Septiembre 2011	2	285.222	3.555	348.4	56.22
	30 Septiembre 2011	3	258.837	3.927	362.7	59.35
	30 Septiembre 2011	4	288.345	3.891	351.7	51.87
15	28 Septiembre 2011	1	53.985	4.478	66.68	8.895
	28 Septiembre 2011	2	61.392	4.315	72.08	10.12
	30 Septiembre 2011	3	62.746	5.008	69.74	11.47
	30 Septiembre 2011	4	57.628	4.601	76.85	12.42
16	26 Septiembre 2011	1	22.051	2.953	63.25	18.28
	26 Septiembre 2011	2	21.179	3.060	29.83	17.57
	26 Septiembre 2011	3	21.463	3.171	59.57	18.29
	26 Septiembre 2011	4	-	3.045	-	18.25

Tabla 43. Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región V

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
1	25 Agosto 2011	1	48.027	-	15.56	5.89
	25 Agosto 2011	2	53.17	-	17.27	6.59
	25 Agosto 2011	3	53.505	-	19.05	6.8
	31 Agosto 2011	4	56.345	5.4	19.76	7.64
	31 Agosto 2011	5	54.04	5.58	18.14	6.49
	31 Agosto 2011	6	47.689	5.29	16.14	6.46
2	25 Agosto 2011	1	31.12	-	65.37	35.85
	25 Agosto 2011	2	31.84	-	67.28	36.09
	25 Agosto 2011	3	29.14	-	68.71	31.3
	31 Agosto 2011	4	43.1295	16.2	70.41	34.2
	31 Agosto 2011	5	30.412	16.04	73.1	37.71
	31 Agosto 2011	6	-	15.84	57.4	28.63
3	25 Agosto 2011	1	124.11	-	106.5	47.1
	25 Agosto 2011	2	132.069	-	90.64	44.04
	25 Agosto 2011	3	139.731	-	93.2	46.78
	31 Agosto 2011	4	106.371	8.5	96.29	42.47
	31 Agosto 2011	5	110.499	7.83	101.1	43.82
	31 Agosto 2011	6	115.209	7.73	97.24	42.66
4	25 Agosto 2011	1	57.12	-	25.23	4.74
	25 Agosto 2011	2	52.56	-	20.13	4.04
	25 Agosto 2011	3	55.96	-	21.86	4.17
	31 Agosto 2011	4	45.072	7.66	25.79	5.36
	31 Agosto 2011	5	42.319	7.71	23.08	5.04
	31 Agosto 2011	6	40.388	7.98	24.44	4.81
5	25 Agosto 2011	1	102.777	-	-	11.13
	25 Agosto 2011	2	96.428	3.21	18.83	13.78
	25 Agosto 2011	3	98.7	3.75	16.61	11.65
	31 Agosto 2011	4	98.508	3.43	17.9	11.51
	31 Agosto 2011	5	99.646	3.53	17.4	11.14
	31 Agosto 2011	6	102.292	3.64	20.74	12.49
6	25 Agosto 2011	1	164.93	-	-	18.91
	25 Agosto 2011	2	173.13	-	36.86	19.68
	25 Agosto 2011	3	179.9	-	36.88	15.89
	31 Agosto 2011	4	165.724	16.17	30.92	14.67
	31 Agosto 2011	5	178.564	18.27	26.2	16.25
	31 Agosto 2011	6	-	17.5	29.99	15.25

Tabla 44. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región V

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
7	25 Agosto 2011	1	199.8	-	28.05	7.04
	25 Agosto 2011	2	191.93	-	26.21	6.79
	25 Agosto 2011	3	182.46	-	35.2	7.92
	31 Agosto 2011	4	151.426	10.22	24.62	7.07
	31 Agosto 2011	5	-	10.72	27.67	8.2
	31 Agosto 2011	6	221.16	10.76	26.12	8.36
8	25 Agosto 2011	1	56.55	-	244.7	20.09
	25 Agosto 2011	2	59.37	-	223.3	19.09
	25 Agosto 2011	3	53.77	-	228.3	18.96
	31 Agosto 2011	4	49.637	3.29	189.12	18.5
	31 Agosto 2011	5	51.335	3.2	179.38	18.48
	31 Agosto 2011	6	48.574	3.37	191	17.65
9	25 Agosto 2011	1	21.29	-	41.03	18.68
	25 Agosto 2011	2	20.71	-	38.67	17.62
	25 Agosto 2011	3	18.08	-	35.42	16.44
	31 Agosto 2011	4	18.51	5.62	38.24	19.58
	31 Agosto 2011	5	16.278	5.64	35.39	17.41
	31 Agosto 2011	6	16.533	5.46	34.39	16.74
10	25 Agosto 2011	1	51.5	-	43.48	13.07
	25 Agosto 2011	2	48.4	-	40.34	13.76
	25 Agosto 2011	3	50.29	-	38.76	12.72
	31 Agosto 2011	4	40.319	6.32	52.98	14.63
	31 Agosto 2011	5	45.383	7.04	39.38	12.51
	31 Agosto 2011	6	40.826	7.1	40.25	12.77
11	25 Agosto 2011	1	106.69	-	41.45	20.55
	25 Agosto 2011	2	114.21	10.965	53.79	20.6
	25 Agosto 2011	3	123.71	10.672	50.08	22.55
	31 Agosto 2011	4	100.078	11.17	43.86	20.57
	31 Agosto 2011	5	108.312	11.13	45.82	24.57
	31 Agosto 2011	6	-	13.72	-	19.81
12	25 Agosto 2011	1	33.11	-	63.49	18.08
	25 Agosto 2011	2	35.4	-	58.02	17.89
	25 Agosto 2011	3	35.05	-	78.7	16.93
	31 Agosto 2011	4	30.325	6.08	58.77	15.05
	31 Agosto 2011	5	30.688	6.43	80.76	-
	31 Agosto 2011	6	28.758	6.73	64.02	15.75

Tabla 45. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región V

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
13	25 Agosto 2011	1	20.46	-	12.56	3.47
	25 Agosto 2011	2	19.56	-	12.46	3.68
	25 Agosto 2011	3	18.98	-	14.75	3.64
	31 Agosto 2011	4	20.146	4.63	10.89	4.43
	31 Agosto 2011	5	20.04	4.2	11.15	4.34
	31 Agosto 2011	6	18.601	4.55	10.49	4.07
14	6 Septiembre 2011	1	104.31	5.284	19.46	6.428
	6 Septiembre 2011	2	104.39	5.089	18.3	6.07
	6 Septiembre 2011	3	-	4.906	16.61	5.4
	9 Septiembre 2011	4	104.3	3.737	14.23	5.52
	9 Septiembre 2011	5	102.17	-	63.49	18.08
	9 Septiembre 2011	6	-	-	58.02	17.89
15	6 Septiembre 2011	1	131.83	10.77	158.8	25.14
	6 Septiembre 2011	2	129.92	11.66	150.5	23.43
	9 Septiembre 2011	3	139.94	9.54	148.8	25.03
	9 Septiembre 2011	4	-	8.699	135.4	20.1
16	6 Septiembre 2011	1	30.447	2.897	69.85	31.46
	6 Septiembre 2011	2	26.644	3.061	63.61	25.51
	9 Septiembre 2011	3	27.634	2.53	81.58	28.1
	9 Septiembre 2011	4	32.255	2.666	62.17	23.76
17	14 Septiembre 2011	1	230.229	25.3	45.67	13.76
	14 Septiembre 2011	2	206.664	24.61	49.95	18.01
	22 Septiembre 2011	3	232.5	25.99	50.35	15.37
	22 Septiembre 2011	4	227.7	23.76	48.97	15.03
18	14 Septiembre 2011	1	226.932	15.75	76.58	32.68
	14 Septiembre 2011	2	245.652	16.07	83.73	35.77
	22 Septiembre 2011	3	232.5	17.15	89.41	37.87
	22 Septiembre 2011	4	260.4	17.35	84.24	37.65
19	14 Septiembre 2011	1	237.831	12.52	49.9	22.87
	14 Septiembre 2011	2	217.173	12.71	47.88	23.02
	22 Septiembre 2011	3	249.3	13.92	58.36	26.53
	22 Septiembre 2011	4	247.2	13.9	55.44	24.68
20	14 Septiembre 2011	1	233.721	1.553	152.5	50.08
	14 Septiembre 2011	2	206.502	1.607	142.4	47.55
	22 Septiembre 2011	3	228.3	1.68	194.5	56.75
	22 Septiembre 2011	4	206.1	1.66	180	55.61

Tabla 46. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región V

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
21	14 Septiembre 2011	1	226.932	2.152	200.8	55.05
	14 Septiembre 2011	2	245.652	2.037	196.9	55.4
	22 Septiembre 2011	3	232.5	2.43	235	60.37
	22 Septiembre 2011	4	260.4	2.71	221.7	59.26
22	14 Septiembre 2011	1	237.831	5.998	98.39	28.79
	14 Septiembre 2011	2	217.173	5.678	99.48	30.38
	22 Septiembre 2011	3	249.3	6.44	111.6	33.24
	22 Septiembre 2011	4	247.2	7.1	117.5	34.71
23	14 Septiembre 2011	1	233.721	2.046	11.93	3.08
	14 Septiembre 2011	2	206.502	2.177	11.62	3.223
	22 Septiembre 2011	3	228.3	2.29	12.52	3.018
	22 Septiembre 2011	4	206.1	2.16	12.94	3.328
24	14 Septiembre 2011	1	270.702	2.68	75.77	26.4
	14 Septiembre 2011	2	281.88	2.826	86.23	28.32
	22 Septiembre 2011	3	258.3	3.07	83.72	34.28
	22 Septiembre 2011	4	267.9	3.35	-	28.55
25	14 Septiembre 2011	1	37.393	3.395	64.11	17.61
	14 Septiembre 2011	2	39.801	3.662	57.95	16.71
	22 Septiembre 2011	3	34.2	4.03	68.76	18.72
	22 Septiembre 2011	4	38.1	4.01	71.11	18.12
26	14 Septiembre 2011	1	4.3936	4.268	5.023	4.879
	14 Septiembre 2011	2	4.7251	4.269	4.949	4.864
	22 Septiembre 2011	3	5.74	5.15	6.118	5.55
	22 Septiembre 2011	4	6.69	5.18	5.894	4.89
27	14 Septiembre 2011	1	71.012	2.542	64.46	9.283
	14 Septiembre 2011	2	70.763	2.711	63.85	9.429
	22 Septiembre 2011	3	65.7	2.96	73.08	9.56
	22 Septiembre 2011	4	66.4	2.92	76.41	10.11
28	14 Septiembre 2011	1	19.5	3.82	51.28	6.246
	14 Septiembre 2011	2	19.674	3.861	36.34	6.984
	22 Septiembre 2011	3	21.6	4.54	46.87	7.64
	22 Septiembre 2011	4	22.6	-	50.15	7.231
29	14 Septiembre 2011	1	260.055	3.879	106.3	16.86
	14 Septiembre 2011	2	-	4.05	95.54	14.69
	22 Septiembre 2011	3	271.59	4.94	128.3	15.6
	22 Septiembre 2011	4	250.32	4.84	124.2	16.58

Tabla 47. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región V

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
30	14 Septiembre 2011	1	17.958	1.565	19.38	4.12
	14 Septiembre 2011	2	15.284	1.517	23.85	4.335
	22 Septiembre 2011	3	11.97	1.62	21.1	3.96
	22 Septiembre 2011	4	16.48	1.84	22.33	4.028
31	14 Septiembre 2011	1	21.969	2.652	31.27	13.22
	14 Septiembre 2011	2	20.262	2.754	38.8	13.11
	22 Septiembre 2011	3	21.1	3.18	31.71	15.48
	22 Septiembre 2011	4	18.56	3.06	31.61	14.91
32	14 Septiembre 2011	1	85.046	3.59	95.62	29.17
	14 Septiembre 2011	2	110.86	3.584	102.2	33.85
	22 Septiembre 2011	3	-	4.045	111.8	32.84
	22 Septiembre 2011	4	91.56	4.52	103.6	28.97
33	14 Septiembre 2011	1	4.3803	2.796	18.71	10.15
	14 Septiembre 2011	2	4.5581	3.084	15.17	9.702
	22 Septiembre 2011	3	6.16	2.783	18.93	10.95
	22 Septiembre 2011	4	5.73	2.643	18.21	10.14
34	14 Septiembre 2011	1	20.322	1.791	15.79	4.027
	14 Septiembre 2011	2	20.309	1.921	11.04	4.598
	22 Septiembre 2011	3	15.74	2.01	14.3	4.26
	22 Septiembre 2011	4	16	2.19	12.97	3.73

Tabla 48. Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región VI

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
1	4 Agosto 2011	1	2.3514	-	19.61	10.93
	4 Agosto 2011	2	4.1482	0.635	19.87	11.37
	4 Agosto 2011	3	4.1026	0.679	20.41	10.94
	9 Agosto 2011	4	3.05	0.754	25.89	11.44
	9 Agosto 2011	5	3.18	0.755	24.41	11.33
	9 Agosto 2011	6	2.6	-	25.42	12
2	4 Agosto 2011	1	22.441	2.512	31.27	14.51
	4 Agosto 2011	2	22.849	2.857	31.67	13.44
	4 Agosto 2011	3	16.737	2.295	31.39	13.99
	9 Agosto 2011	4	20.28	2.76	35.54	14.47
	9 Agosto 2011	5	16.41	2.73	34.09	12
	9 Agosto 2011	6	20.99	-	32.26	12.82
3	4 Agosto 2011	1	18.896	1.184	3.254	3.24
	4 Agosto 2011	2	20.836	1.159	3.537	2.884
	4 Agosto 2011	3	18.12	1.281	4.292	2.485
	9 Agosto 2011	4	18.289	1.2	3.35	2.82
	9 Agosto 2011	5	18.366	1.21	4.43	3.13
	9 Agosto 2011	6	15.37	-	-	3.29
4	4 Agosto 2011	1	5.1968	1.46	38.74	11.37
	4 Agosto 2011	2	5.2498	1.45	35.02	11.27
	4 Agosto 2011	3	5.7468	1.48	35.93	11.72
	9 Agosto 2011	4	7.6699	1.44	36.41	11.26
	9 Agosto 2011	5	9.7296	1.44	37.86	11.88
	9 Agosto 2011	6	-	-	39.23	12.11
5	4 Agosto 2011	1	8.2349	1.148	28	6.501
	4 Agosto 2011	2	6.4668	1.371	25.9	6.215
	4 Agosto 2011	3	-	1.361	25.97	6.579
	9 Agosto 2011	4	10.32	1.14	31.43	6.92
	9 Agosto 2011	5	11.98	1.24	29.68	6.51
	9 Agosto 2011	6	9.12	-	28.57	6.18
6	4 Agosto 2011	1	7.9291	2.594	22.17	11.34
	4 Agosto 2011	2	9.9119	2.75	22.56	12.28
	4 Agosto 2011	3	8.7052	2.493	21.82	11.68
	9 Agosto 2011	4	-	2.73	25.91	11.97
	9 Agosto 2011	5	7.87	2.67	26.31	11.33
	9 Agosto 2011	6	9.18	-	26.53	12.48

Tabla 49. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región VI

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
7	25 Agosto 2011	1	16.99	-	32.39	13.2
	25 Agosto 2011	2	-	-	36.57	12.21
	25 Agosto 2011	3	12.23	-	34.53	11.68
	31 Agosto 2011	4	13.995	2.3	36.07	13.53
	31 Agosto 2011	5	14.404	2.91	39.06	15.07
	31 Agosto 2011	6	14.74	2.53	35.07	13.1
8	25 Agosto 2011	1	8	-	8.2	2.99
	25 Agosto 2011	2	9.02	-	8.44	3.31
	25 Agosto 2011	3	9.19	-	7.9	3.23
	31 Agosto 2011	4	8.8429	1.66	6.28	3.38
	31 Agosto 2011	5	8.4839	1.69	-	3.39
	31 Agosto 2011	6	7.8667	1.66	6.43	3.59
9	25 Agosto 2011	1	15.65	-	26.05	6.75
	25 Agosto 2011	2	-	-	25.79	6.74
	25 Agosto 2011	3	13.19	-	28.21	7.8
	31 Agosto 2011	4	14.177	2.16	30.13	8.65
	31 Agosto 2011	5	13.284	1.92	30.28	8.82
	31 Agosto 2011	6	14.789	2.04	30.5	8.41
10	25 Agosto 2011	1	-	-	35.36	11.52
	25 Agosto 2011	2	7.93	-	-	11.97
	25 Agosto 2011	3	12.435	-	32.31	12.31
	31 Agosto 2011	4	11.548	1.61	32.14	14.52
	31 Agosto 2011	5	10.183	1.85	37.2	15.4
	31 Agosto 2011	6	9.1216	2.02	39.33	14.53
11	25 Agosto 2011	1	16.99	-	22.63	12.11
	25 Agosto 2011	2	-	-	19.99	12.06
	25 Agosto 2011	3	12.23	-	21.1	11.79
	31 Agosto 2011	4	13.995	4.88	26.26	14.28
	31 Agosto 2011	5	14.404	4.69	25.42	14.5
	31 Agosto 2011	6	14.74	4.21	22.96	13.15
12	6 Septiembre 2011	1	9.2219	2.172	9.51	6.11
	6 Septiembre 2011	2	8.6712	2.261	9.27	5.48
	9 Septiembre 2011	3	12.769	1.843	10.38	5.76
	9 Septiembre 2011	4	11.207	1.707	9.06	4.95

Tabla 50. (Continuación) Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región VI

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
13	6 Septiembre 2011	1	9.168	1.827	6.994	3.021
	6 Septiembre 2011	2	8.7288	1.827	7.8	2.889
	9 Septiembre 2011	3	8.2598	1.806	6.83	2.852
	9 Septiembre 2011	4	8.2677	1.699	7.883	2.61
14	6 Septiembre 2011	1	17.709	3.979	25.03	8.04
	6 Septiembre 2011	2	16.558	3.405	27.86	8.48
	9 Septiembre 2011	3	17.492	3.49	28.33	8.56
	9 Septiembre 2011	4	15.22	3.288	26.53	7.4
15	6 Septiembre 2011	1	15.43	4.461	20.74	10.03
	6 Septiembre 2011	2	17.948	4.242	22.93	10.05
	9 Septiembre 2011	3	15.8	4.203	20.66	8.48
	9 Septiembre 2011	4	19.706	4.138	21.19	8.72
16	26 Septiembre 2011	1	7.0793	1.856	38.38	12.04
	26 Septiembre 2011	2	6.5323	1.899	54.74	17.39
	30 Septiembre 2011	3	7.0814	1.846	40.54	13.25
	30 Septiembre 2011	4	6.6151	1.910	45.56	15.57
17	26 Septiembre 2011	1	9.0326	0.188	21.23	11.30
	26 Septiembre 2011	2	6.0753	0.100	18.33	9.410
	30 Septiembre 2011	3	9.0254	0.167	20.54	10.54
	30 Septiembre 2011	4	6.0214	0.125	19.57	10.87
18	26 Septiembre 2011	1	39.312	2.288	22.64	9.989
	26 Septiembre 2011	2	36.167	2.013	21.59	9.704
	30 Septiembre 2011	3	39.246	2.152	21.54	9.874
	30 Septiembre 2011	4	36.056	2.154	21.57	9.604
19	26 Septiembre 2011	1	2.2127	0.100	3.547	2.506
	26 Septiembre 2011	2	1.4504	0.151	3.174	2.085
	30 Septiembre 2011	3	2.1547	0.947	3.215	2.154
	30 Septiembre 2011	4	1.6584	0.831	3.347	2.648

Tabla 51. Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región VII

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
1	14 Septiembre 2011	1	6.432	2.754	2.611	2.338
	14 Septiembre 2011	2	6.237	2.639	3.56	2.444
	22 Septiembre 2011	3	6.93	2.96	2.813	2.694
	22 Septiembre 2011	4	7.16	2.95	2.751	2.7
2	14 Septiembre 2011	1	16.345	1.145	19.29	12.36
	14 Septiembre 2011	2	15.798	1.237	25.81	11.75
	22 Septiembre 2011	3	11.49	1.38	24.63	11.98
	22 Septiembre 2011	4	12.47	1.43	24.33	12.07
3	14 Septiembre 2011	1	57.334	1.87	24.24	7.408
	14 Septiembre 2011	2	69.085	1.791	23.28	7.066
	22 Septiembre 2011	3	82.35	2.28	27.86	7.76
	22 Septiembre 2011	4	-	2.44	26.32	8.05
4	14 Septiembre 2011	1	28.066	3.942	51.34	9.309
	14 Septiembre 2011	2	20.535	4.06	47.35	8.621
	22 Septiembre 2011	3	22.14	4.74	61.98	9.18
	22 Septiembre 2011	4	21.66	5.01	60.13	8.95
5	14 Septiembre 2011	1	28.832	3.777	19.39	3.876
	14 Septiembre 2011	2	27.294	3.689	15.74	4.376
	22 Septiembre 2011	3	26.42	4.37	19.21	3.59
	22 Septiembre 2011	4	27.89	4.39	19.91	3.53
6	14 Septiembre 2011	1	17.077	2.446	15.3	6.819
	14 Septiembre 2011	2	12.827	2.239	15.37	7.011
	22 Septiembre 2011	3	-	2.71	13.14	6.35
	22 Septiembre 2011	4	13.06	2.81	15.71	7.5
7	14 Septiembre 2011	1	27.949	2.369	11.34	7.029
	14 Septiembre 2011	2	27.588	-	14.51	7.785
	22 Septiembre 2011	3	26.6	2.75	11.05	7.3
	22 Septiembre 2011	4	24.09	2.61	13.83	6.77
8	14 Septiembre 2011	1	19.1572	1.759	24.15	6.792
	14 Septiembre 2011	2	24.262	1.847	25.35	6.87
	22 Septiembre 2011	3	22.29	2.01	27.12	6.46
	22 Septiembre 2011	4	20.6	2.17	29.26	6.7

Tabla 52. Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región VII

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
9	14 Septiembre 2011	1	23.8696	3.375	6.91	7.074
	14 Septiembre 2011	2	27.778	3.454	6.376	6.702
	22 Septiembre 2011	3	22.74	3.65	6.81	6.12
	22 Septiembre 2011	4	30.69	3.91	6.985	6.4
10	14 Septiembre 2011	1	31.001	2.826	14.18	7.366
	14 Septiembre 2011	2	30.951	2.835	16.19	7.429
	22 Septiembre 2011	3	27.92	3.43	15.64	6.87
	22 Septiembre 2011	4	21.1	3.54	16.32	7.02
11	14 Septiembre 2011	1	64.125	8.36	30.32	10.63
	14 Septiembre 2011	2	62.161	7.828	35.44	8.701
	22 Septiembre 2011	3	79.16	10.49	30.33	11.24
	22 Septiembre 2011	4	78.78	9.85	30.18	12.11
12	14 Septiembre 2011	1	45.634	1.419	122.4	7.206
	14 Septiembre 2011	2	43.478	1.315	116.4	7.145
	22 Septiembre 2011	3	43.34	1.257	123.6	7.42
	22 Septiembre 2011	4	42.15	1.37	123.9	7.175
13	14 Septiembre 2011	1	7.887	3.15	36.96	8.069
	14 Septiembre 2011	2	7.7093	3.38	31.82	7.341
	22 Septiembre 2011	3	9.281	3.125	37.57	7.42
	22 Septiembre 2011	4	8.185	3.104	35.45	8.703
14	14 Septiembre 2011	1	51.318	9.15	30.38	8.395
	14 Septiembre 2011	2	42.243	9.394	31.69	8.223
	22 Septiembre 2011	3	48.29	11.32	29.45	8.95
	22 Septiembre 2011	4	-	10.94	33.22	8.25
15	28 Septiembre 2011	1	45.81	1.182	164.1	9.09
	28 Septiembre 2011	2	43.395	1.13	161.7	7.488
	30 Septiembre 2011	3	47.925	1.17	158.2	8.64
	30 Septiembre 2011	4	47.562	1.05	178	7.88
16	28 Septiembre 2011	1	5.952	1.57	2.721	0.641
	28 Septiembre 2011	2	5.279	1.708	2.642	0.67
	30 Septiembre 2011	3	-	1.69	2.66	0.568
	30 Septiembre 2011	4	4.2645	1.89	2.82	0.78

Tabla 53. Mediciones obtenidas de fósforo, potasio, calcio y magnesio por intercambio iónico en suelos de Región VII

No.	Fecha de medición	Repetición	Fósforo, ppm	Potasio, mmol c/L	Calcio, mmol c/L	Magnesio, mmol c/L
17	28 Septiembre 2011	1	2.01	1.678	6.18	2.139
	28 Septiembre 2011	2	3.674	1.528	7.38	2.571
	30 Septiembre 2011	3	2.976	1.71	8.18	2.175
	30 Septiembre 2011	4	2.854	1.77	7.66	2.162
18	28 Septiembre 2011	1	-	6.15	13.09	4.07
	28 Septiembre 2011	2	11.07	5.78	13.37	3.32
	30 Septiembre 2011	3	14.28	6.48	14.02	3.22
	30 Septiembre 2011	4	11.894	6.8	15.24	3.64
19	28 Septiembre 2011	1	10.19	4.44	30.93	8.64
	28 Septiembre 2011	2	14.83	4.59	28.7	7.39
	30 Septiembre 2011	3	11.246	5.03	35.56	8.1
	30 Septiembre 2011	4	10.217	5.04	37.68	8.1
20	28 Septiembre 2011	1	47.4	6.37	30.34	9.77
	28 Septiembre 2011	2	45.2	6.28	32.12	8.85
	30 Septiembre 2011	3	-	6.83	36.97	9.45
	30 Septiembre 2011	4	45.354	6.64	38.67	9.05
21	28 Septiembre 2011	1	41.81	5.36	47.31	10.62
	28 Septiembre 2011	2	47.59	5.19	54.35	11.78
	30 Septiembre 2011	3	33.1	5.93	50.1	11.38
	30 Septiembre 2011	4	41.18	5.18	44.13	10.45
22	28 Septiembre 2011	1	7.66	1.19	43.16	28.54
	28 Septiembre 2011	2	8.75	1.3	49.26	29.03
	30 Septiembre 2011	3	7.2544	1.5	39.92	27.64
	30 Septiembre 2011	4	7.4116	1.35	41.48	29.2
23	28 Septiembre 2011	1	3.6792	4.67	13.39	9.71
	28 Septiembre 2011	2	4.6619	5.453	13.81	10.32
	30 Septiembre 2011	3	5.2836	5.34	12.38	10.38
	30 Septiembre 2011	4	5.8303	4.95	14.35	10.76

2. Análisis de muestras por otros métodos

Tabla 54. Extracción de analitos por métodos de Olsen, KCl y Mehlich I para muestras de Región I

Muestra No.	Método Olsen modificado		Extracción Cloruro de Potasio		Método Mehlich I	
	Fósforo (ppm)	Potasio (mmol c/L)	Calcio (mmol c/L)	Magnesio (mmol c/L)	Fósforo (ppm)	Potasio (mmol c/L)
1	11.09	5.50	8.90	2.00	1.60	2.79
2	16.14	3.60	25.60	4.50	84.81	2.86
3	10.33	2.00	24.30	2.80	10.27	1.31
4	10.37	2.40	42.50	9.10	2.61	1.63
5	22.02	1.70	14.30	4.30	43.46	1.34
6	7.32	1.00	4.70	1.70	17.32	0.52
7	15.98	3.90	9.40	2.40	19.53	2.88
8	4.00	2.10	25.50	4.70	1.31	1.34
9	32.85	5.30	13.20	5.50	34.52	3.96
10	12.61	2.30	22.20	6.30	8.79	2.62
11	6.28	1.00	12.10	4.20	19.36	0.72
12	12.36	1.00	30.90	1.40	72.58	0.48
13	9.27	1.20	29.40	7.10	3.38	1.36
14	5.05	1.00	10.70	2.00	8.65	0.57
15	10.98	1.40	29.80	6.40	22.41	1.68
16	18.64	1.30	7.00	2.10	29.92	1.57
17	21.32	6.80	31.50	5.80	23.42	4.76
18	16.54	2.10	1.00	1.00	2.53	1.59
19	4.47	1.30	2.30	1.00	8.33	0.95
20	32.24	2.00	9.10	1.10	197.45	1.47
21	14.30	1.40	20.20	7.00	133.08	1.00
22	8.14	1.80	13.00	1.90	6.17	1.25
23	8.04	2.90	8.90	3.30	11.94	2.52
24	25.63	1.50	2.40	1.00	45.37	1.07
25	10.16	1.50	1.00	1.00	2.24	0.99

Tabla 55. Extracción de analitos por métodos de Olsen, KCl y Mehlich I para muestras de Región II

Muestra No.	Método Olsen modificado		Extracción Cloruro de Potasio		Método Mehlich I	
	Fósforo (ppm)	Potasio (mmol c/L)	Calcio (mmol c/L)	Magnesio (mmol c/L)	Fósforo (ppm)	Potasio (mmol c/L)
1	2.85	2.40	11.40	6.20	2.13	2.60
2	15.96	2.50	22.30	4.40	8.13	2.72
3	1.85	5.90	41.50	6.70	1.02	6.18
4	3.95	3.40	19.00	4.20	1.93	5.16
5	2.26	5.80	40.60	6.40	1.12	5.94
6	5.88	3.60	4.30	2.20	5.03	3.24
7	102.90	1.10	18.60	11.20	366.37	1.53
8	1.41	1.00	1.20	1.00	0.09	0.30
9	18.82	1.00	1.00	1.00	2.89	0.94
10	22.99	3.10	7.60	3.90	8.88	3.58
11	12.89	4.80	1.00	1.00	4.89	5.00
12	6.34	1.00	23.10	3.30	3.83	0.74
13	4.02	1.00	1.00	2.60	2.65	0.22
14	15.48	6.70	45.00	11.10	11.83	7.06
15	3.74	9.38	7.80	1.40	1.66	7.04
16	14.29	1.60	22.90	5.70	5.16	1.92
17	2.95	5.50	4.80	1.40	2.69	6.31
18	23.59	2.10	29.90	3.20	26.86	1.92
19	21.24	5.70	47.30	10.20	25.14	6.02
20	46.24	2.40	60.00	12.20	63.81	2.04

Tabla 56. Extracción de analitos por métodos de Olsen, KCl y Mehlich I para muestras de Región III

Muestra No.	Método Olsen modificado		Extracción Cloruro de Potasio		Método Mehlich I	
	Fósforo (ppm)	Potasio (mmol c/L)	Calcio (mmol c/L)	Magnesio (mmol c/L)	Fósforo (ppm)	Potasio (mmol c/L)
1	35.77	7.70	79.90	20.70	17.66	4.08
2	122.29	5.30	38.20	9.90	103.16	4.08
3	82.29	9.40	108.50	25.90	113.44	8.55
4	17.78	11.60	71.30	26.40	11.98	8.91
5	13.82	8.40	46.20	19.60	2.70	6.29
6	29.09	8.20	70.30	24.00	13.21	5.71
7	49.42	3.50	50.50	8.30	28.53	2.65
8	14.01	1.90	61.10	9.40	11.25	1.37
9	9.24	4.20	71.40	9.20	3.97	3.75
10	9.09	1.00	9.80	1.20	8.56	0.59
11	87.27	4.90	45.10	13.10	107.72	3.42
12	11.98	5.30	42.00	15.20	3.70	4.71
13	12.22	5.50	70.70	10.60	0.60	4.62

Tabla 57. Extracción de analitos por métodos de Olsen, KCl y Mehlich I para muestras de Región IV

Muestra No.	Método Olsen modificado		Extracción Cloruro de Potasio		Método Mehlich I	
	Fósforo (ppm)	Potasio (mmol c/L)	Calcio (mmol c/L)	Magnesio (mmol c/L)	Fósforo (ppm)	Potasio (mmol c/L)
1	106.15	5.30	91.10	24.50	67.39	4.88
2	131.06	5.50	144.10	29.60	132.39	4.41
3	61.49	4.40	69.00	12.80	40.91	3.48
4	26.02	6.80	58.50	17.70	24.25	5.79
5	6.92	4.60	29.80	7.40	2.72	4.16
6	5.17	3.40	31.20	10.30	2.09	3.48
7	11.77	5.00	62.90	16.40	3.03	4.31
8	6.78	1.30	43.80	10.40	0.79	0.90
9	21.41	8.80	34.40	15.00	7.18	8.38
10	15.78	6.90	155.70	44.60	13.08	5.71
11	7.51	2.90	167.40	53.70	0.49	2.35
12	5.73	1.50	30.10	7.70	0.77	1.34
13	14.82	5.40	100.30	27.30	10.27	4.89
14	157.83	3.10	342.00	130.40	284.52	3.85
15	52.83	4.30	115.10	12.20	48.24	4.17
16	7.59	4.40	34.70	10.40	9.86	4.02

Tabla 58. Extracción de analitos por métodos de Olsen, KCl y Mehlich I para muestras de Región V

Muestra No.	Método Olsen modificado		Extracción Cloruro de Potasio		Método Mehlich I	
	Fósforo (ppm)	Potasio (mmol c/L)	Calcio (mmol c/L)	Magnesio (mmol c/L)	Fósforo (ppm)	Potasio (mmol c/L)
1	41.88	3.70	23.80	9.70	22.42	3.67
2	49.76	18.70	44.10	24.80	0.49	17.03
3	69.88	7.60	59.30	30.00	83.45	7.09
4	45.24	5.90	32.50	7.20	34.35	6.17
5	182.34	2.60	19.00	13.30	250.92	2.23
6	250.12	13.60	37.20	22.40	349.44	12.44
7	303.40	8.10	37.50	11.00	292.29	7.46
8	8.71	1.80	128.20	15.90	33.06	2.42
9	5.10	2.70	40.00	21.40	4.34	3.22
10	45.55	4.60	41.90	13.80	47.89	4.08
11	147.31	8.60	36.90	18.80	237.89	8.69
12	14.86	4.50	57.70	17.00	8.54	4.57
13	27.65	2.40	3.50	3.50	5.60	1.28
14	152.05	3.80	13.80	6.40	143.25	2.78
15	177.85	12.10	133.90	22.80	356.47	9.17
16	21.44	3.40	73.00	16.30	13.46	2.25
17	123.43	21.20	57.80	15.20	130.27	21.79
18	140.47	16.00	67.90	33.00	163.45	15.25
19	133.54	12.70	70.00	28.00	129.62	11.31
20	32.86	2.70	177.00	65.00	46.72	1.83
21	27.67	3.70	202.10	70.00	36.68	2.22
22	7.42	7.70	144.40	39.50	0.89	5.40
23	6.58	1.80	20.30	2.10	0.20	1.34
24	62.85	3.20	114.90	36.00	32.33	2.26
25	6.93	4.20	127.30	28.30	3.28	2.97
26	12.06	3.90	7.30	6.40	5.33	2.70
27	76.02	3.20	102.90	14.20	70.63	2.12
28	21.19	4.20	90.90	14.90	8.79	2.99
29	141.60	4.70	93.90	20.60	190.54	3.31
30	9.02	1.10	26.10	4.20	0.01	2.08
31	6.73	2.60	56.80	24.10	0.56	3.17
32	43.52	4.20	86.10	24.10	34.40	2.01
33	5.48	2.50	25.80	11.80	0.56	1.05
34	7.18	1.60	17.10	5.00	0.02	1.46

Tabla 59. Extracción de analitos por métodos de Olsen, KCl y Mehlich I para muestras de Región VI

Muestra No.	Método Olsen modificado		Extracción Cloruro de Potasio		Método Mehlich I	
	Fósforo (ppm)	Potasio (mmol c/L)	Calcio (mmol c/L)	Magnesio (mmol c/L)	Fósforo (ppm)	Potasio (mmol c/L)
1	1.59	1.00	25.90	14.30	0.55	0.42
2	4.91	2.10	50.30	24.10	1.82	2.11
3	16.96	1.00	1.10	1.70	2.62	0.77
4	4.46	1.20	57.70	22.60	1.53	0.94
5	1.75	1.00	42.10	11.80	0.84	0.91
6	3.26	1.70	29.00	20.00	1.12	1.76
7	4.29	1.60	57.80	20.20	1.74	1.38
8	7.12	1.20	1.40	1.80	3.20	0.68
9	6.18	1.00	65.50	16.00	1.54	0.93
10	2.38	1.70	53.50	23.30	1.91	0.73
11	1.94	2.60	57.00	31.60	1.92	2.41
12	6.96	1.50	12.00	4.10	3.13	0.99
13	7.99	1.00	6.30	1.60	3.33	1.02
14	6.11	2.80	48.60	11.30	0.04	2.00
15	22.01	3.80	27.80	9.70	10.54	2.29
16	10.52	3.00	64.60	17.99	0.59	2.47
17	16.54	1.50	18.80	12.90	9.63	1.27
18	87.15	4.00	30.40	12.00	71.84	2.51
19	10.21	1.00	0.50	1.20	1.42	0.52

Tabla 60. Extracción de analitos por métodos de Olsen, KCl y Mehlich I para muestras de Región VII

Muestra No.	Método Olsen modificado		Extracción Cloruro de Potasio		Método Mehlich I	
	Fósforo (ppm)	Potasio (mmol c/L)	Calcio (mmol c/L)	Magnesio (mmol c/L)	Fósforo (ppm)	Potasio (mmol c/L)
1	3.93	2.10	1.00	1.00	0.01	1.46
2	9.56	1.00	40.70	22.60	5.08	0.53
3	67.09	1.70	49.40	19.30	74.94	1.22
4	8.20	3.40	122.70	27.20	12.26	2.09
5	18.11	3.00	26.30	5.80	8.96	2.28
6	6.08	1.80	16.40	14.90	2.08	1.42
7	11.58	1.60	14.20	7.50	2.85	1.35
8	9.69	1.30	37.50	8.60	1.00	0.90
9	17.81	2.80	8.70	8.90	7.93	2.12
10	7.04	2.50	14.10	11.00	1.94	1.94
11	40.72	8.60	83.60	36.70	47.02	4.56
12	21.89	1.80	90.80	5.40	24.91	1.11
13	6.69	3.00	61.30	10.00	4.50	1.56
14	21.99	9.00	80.70	27.70	19.43	5.39
15	39.43	1.90	144.20	5.30	13.13	1.24
16	3.37	1.20	1.00	1.00	0.03	0.82
17	1.95	2.10	1.00	1.00	0.05	0.79
18	3.42	5.20	21.60	5.80	1.43	4.02
19	5.02	5.20	64.10	14.30	2.14	3.74
20	32.56	8.20	39.90	11.00	30.38	4.53
21	37.28	5.90	90.60	19.60	21.92	3.73
22	3.57	1.60	79.00	39.80	0.04	1.40
23	6.04	4.70	40.30	34.20	2.41	2.85

Tabla 61. Concentraciones iniciales utilizadas para elaborar las curvas de equilibrio y concentraciones finales obtenidas tras una extracción por resinas de intercambio iónico.

Concentración inicial en solución (Co)				Concentración final en equilibrio (Ce)			
Fósforo (mg/L)	Calcio (mmol/L)	Potasio (mmol/L)	Magnesio (mmol/L)	Fósforo (mg/L)	Calcio (mg/L)	Potasio (mg/L)	Magnesio (mg/L)
0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
5	25	1	5	1.28	47.15	5.25	6.25
10	50	2	10	1.79	68.83	10.19	11.98
20	100	4	20	2.10	88.04	11.51	15.25
40	120	6	30	2.84	117.80	15.26	22.83
80	140	8	40	4.03	124.33	19.23	28.87
100	180	10	50	5.05	142.48	24.58	33.25
120	200	15	70	6.23	166.21	27.22	36.84
140	250	20	80	7.47	180.72	32.85	41.90
180	300	22.5	90	8.39	205.56	36.23	45.59
200	350	25	100	12.53	222.59	40.49	49.55

G. Cálculo de muestra

Cálculo No. 1 Promedio de P, K, Ca y Mg para cada muestra según el método de intercambio iónico

Dado que en el análisis de intercambio iónico se analizó cada muestra en tres a seis repeticiones, se procedió a calcular el valor promedio del total de mediciones para cada muestra. El siguiente ejemplo muestra el cálculo del promedio de fósforo de la muestra 1, Región I utilizando la Ecuación 7 (página 19) con los datos de la Tabla 31, página 75.

$$\begin{aligned} \overline{[P]}_{Muestra\ 1,Región\ I} &= \frac{\sum_{i=1}^4 \overline{[P]}_i}{4} \\ \overline{[P]}_{Muestra\ 1,Región\ I} &= \frac{11.911ppm + 12.943ppm + 10.821ppm + 10.123ppm}{4} \\ \overline{[P]}_{Muestra\ 1,Región\ I} &= \frac{45.798ppm}{4} = 11.449\ ppm \approx 11.45\ ppm \end{aligned}$$

Los resultados de este cálculo se enlistan desde la Tabla 62 hasta la Tabla 68 (Páginas 108 a 114), según la región a la que pertenece cada muestra.

Cálculo No. 2 Promedio de P, K, Ca y Mg de cada región cafetalera según el método evaluado.

Para obtener la media geométrica de fósforo, potasio, calcio y magnesio del total de muestras de cada región, se promedió todos los valores obtenidos en esa región específica según el método evaluado. El siguiente ejemplo corresponde al promedio de fósforo para la región I según el método de intercambio iónico. Se utilizó la Ecuación 8, página 20, con los datos de la Tabla 62 hasta la Tabla 68 (Páginas 108 a 114), para todas las regiones.

$$\begin{aligned} \overline{[P]}_{Región\ I} &= \frac{\sum_{i=1}^{25} \overline{[P]}_{Muestra\ i}}{25} \\ \overline{[P]}_{Región\ I} &= \frac{\left(\begin{array}{l} 11.45 + 26.34 + 14.13 + 17.20 + 35.32 + 64.01 + 15.27 + 5.53 + 37.14 + \\ 10.04 + 15.24 + 126.13 + 11.13 + 11.56 + 29.42 + 33.09 + 51.40 + 17.84 + \\ 9.89 + 58.13 + 96.85 + 8.80 + 61.82 + 24.63 + 15.52 \end{array} \right) ppm}{25} \\ \overline{[P]}_{Región\ I} &= \frac{807.8812\ ppm}{25} = 32.3152ppm \approx 32.32ppm \end{aligned}$$

Los resultados de este cálculo se muestran desde la Tabla 8, Tabla 12, Tabla 17, Tabla 20 (Páginas 34, 39, 42 y 44 respectivamente) según el elemento analizado: fósforo, potasio, calcio y magnesio respectivamente.

Se utilizó la ecuación de Freundlich (Ver Ecuación 1, página 7) para trazar las isotermas que describen el proceso de adsorción del soluto de interés sobre las resinas de intercambio iónico, i.e., el adsorbente. Para esto, se realizó una prueba de adsorción con diferentes soluciones de cada elemento (P, K, Ca y Mg) a diferentes concentraciones conocidas. Se mantuvo constante la masa de resina para cada solución (mResina = 2.7 g) y se llevó a cabo un agitado constante por 16 horas. Al final del proceso, se midió la concentración final de cada solución que representa la concentración en equilibrio. En la Tabla 61, página 104 se muestran todas estas concentraciones.

Cálculo No. 3 Diferencia entre concentración inicial y concentración en equilibrio

A continuación, los cálculos realizados para la curva de equilibrio de fósforo. Las curvas para el resto de elementos (K, Mg y Ca) se calcularon de igual manera. Primero se calculó la diferencia entre las concentraciones inicial y final. El siguiente cálculo corresponde al punto de la concentración inicial de 80.0 mg/L, con una concentración final de 4.03 mg/L.

$$C_o - C_e \text{ (mg/L)} = 80.0 \text{ mg/L} - 4.032 \text{ mg/L} = 75.968 \text{ mg P/L}$$

Cálculo No. 4 Adsorción aparente del soluto sobre la superficie de las resinas intercambiadoras de iones.

Conociendo la densidad de las resinas ($\rho_{\text{Resina}} = 1.08 \text{ g/mL}$), el volumen de resina utilizado ($v_{\text{Resina}} = 2.5 \text{ mL}$) y el volumen de solución utilizado para el experimento ($V = 50.0 \text{ mL}$), se puede calcular con la información de la página 7 la adsorción aparente (q_e) del soluto.

$$q_e \left[\frac{\text{mg soluto}}{\text{g adsorbente}} \right] = \frac{V(C_o - C_e)}{m_{\text{Resina}}} = \frac{V(C_o - C_e)}{\rho_{\text{Resina}} \times v_{\text{Resina}}}$$

$$q_e \left[\frac{\text{mg soluto}}{\text{g adsorbente}} \right] = \frac{50.0 \text{ mL solución} \times \frac{1.0 \text{ L}}{1,000 \text{ mL}} \times \frac{75.968 \text{ mg P}}{1.0 \text{ L solución}}}{\frac{1.08 \text{ g Resina}}{1.0 \text{ mL Resina}} \times 2.5 \text{ mL Resina}}$$

$$q_e \left[\frac{\text{mg soluto}}{\text{g adsorbente}} \right] = 1.407 \text{ mg P/g Resina}$$

Cálculo No. 5 Prueba de la ecuación de Freundlich

Se procede a calcular el logaritmo de la adsorción aparente ($\log q_e$) y el logaritmo de la concentración en equilibrio ($\log C_e$) para conseguir los puntos en la escala logarítmica sobre los cuales se hará una regresión lineal. El eje X corresponde a los puntos $\log q_e$ y el eje Y a los puntos de $\log C_e$.

$$\log q_e = \log(1.407 \text{ mg P/g Resina}) = 0.148$$

$$\log C_e = \log(4.032 \text{ mg/L}) = 0.606$$

Tras aplicar un análisis de regresión lineal utilizando Microsoft Excell se determinó que los puntos forman una recta con la ecuación $y = 0.5246x + 0.6385$ con un coeficiente de regresión $r^2 = 0.9238$. La alta correlación entre los puntos confirma que se cumple la ecuación de Freundlich y por tanto se puede utilizar la Ecuación 1 (página 7) para trazar la curva de equilibrio en el proceso de adsorción. Las rectas sobre la escala logarítmica se encuentran

Cálculo No. 6 Ecuación de Freundlich y trazado de la curva de equilibrio

Según el cálculo No. 4, la pendiente de la recta fue $n = 0.5246$ y el intercepto es igual a $K = 0.6385$. Por lo tanto, la concentración del soluto en equilibrio en la solución (c^*) se calcula utilizando la Ecuación 1, página 7:

$$c^* = k[v(C_o - C_e)]^n$$

$$c^* = 0.6385 \times \left[50.0 \text{ mL solución} \times \frac{1.0 \text{ L}}{1,000 \text{ mL}} \times (75.968 \text{ mg P/L}) \right]^{0.5246}$$

$$c^* = 1.286$$

A partir de los puntos calculados con esta ecuación se puede trazar la curva de equilibrio que describe la adsorción del soluto de interés sobre la superficie de las resinas de intercambio iónico. Según la teoría, el intercambio iónico es un caso especial de adsorción que puede ser descrito satisfactoriamente en el equilibrio como la ecuación de Freundlich. Las curvas de equilibrio para cada soluto se encuentran en la Figura 105 a la Figura 108 (páginas 147 a la 148).

H. Análisis de error

Cálculo No. 3. Desviación estándar de P, K, Ca y Mg para cada muestra según el método de intercambio iónico

Dado que en el análisis de intercambio iónico se analizó cada muestra en tres a seis repeticiones, se procedió a calcular la desviación estándar del total de repeticiones para cada muestra. El siguiente ejemplo muestra el cálculo de la desviación estándar de fósforo de la muestra 1, Región I utilizando la Ecuación 10 (página 21) con los datos de la Tabla 31 (Página 75):

$$S_{Muestra\ I,Región\ I} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 (\overline{[P]}_i - \overline{[P]}_{Muestra\ I,Región\ I})^2}{4 - 1}}$$

$$S_{Muestra\ I,Región\ I} = \sqrt{\frac{(11.449\ ppm - 11.911\ ppm)^2 + (11.449\ ppm - 10.821\ ppm)^2 + (11.449\ ppm - 12.943\ ppm)^2 + (11.449\ ppm - 10.123\ ppm)^2}{4 - 1}}$$

$$S_{Muestra\ I,Región\ I} = \sqrt{\frac{4.59814}{3}} = 1.238028 \approx 1.24$$

Los resultados de este cálculo se enlistan desde la Tabla 62 hasta la Tabla 68 (páginas 108 a 114), según la región a la que pertenece cada muestra.

Cálculo No. 4. Coeficiente de variación de P, K, Ca y Mg para cada muestra según el método de intercambio iónico

Dado que en el análisis de intercambio iónico se analizó cada muestra en tres a seis repeticiones, se procedió a calcular el coeficiente de variación del total de repeticiones para cada muestra. El siguiente ejemplo muestra el cálculo del coeficiente de variación de fósforo de la muestra 1, Región I utilizando la Ecuación 11 (página 21) con los datos de la Tabla 31 (página 75):

$$\%C.V._{Muestra\ I,Región\ I} = \frac{S_{Muestra\ I,Región\ I}}{\overline{[P]}_{Muestra\ I,Región\ I}} \times 100\%$$

$$\%C.V._{Muestra\ I,Región\ I} = \frac{1.238028}{11.449\ ppm} \times 100\% = 0.108134 \times 100\%$$

$$\%C.V._{Muestra\ I,Región\ I} = 10.8134\% \approx 10.81\%$$

Los resultados de este cálculo se enlistan desde la Tabla 62 hasta la Tabla 68 (páginas 108 a 114), según la región a la que pertenece cada muestra.

I. Datos calculados

Tabla 62. Promedio de lecturas, desviación estándar y coeficiente de variación en Región I

No. Muestra	Fósforo			Potasio			Calcio			Magnesio		
	\bar{x} (ppm)	S ^{2*}	C.V.** (%)	\bar{x} (mmol/L)	S ^{2*}	C.V.** (%)	\bar{x} (mmol/L)	S ^{2*}	C.V.** (%)	\bar{x} (mmol/L)	S ^{2*}	C.V.** (%)
1	11.45	1.24	10.81	5.58	0.68	12.11	7.00	0.99	14.09	3.46	0.45	12.92
2	26.34	4.24	16.10	4.31	0.63	14.53	16.26	0.58	3.55	4.72	0.51	10.72
3	14.13	1.18	8.35	2.54	0.32	12.61	16.66	0.93	5.55	3.89	0.33	8.47
4	17.20	1.69	9.84	2.65	0.35	13.25	22.52	2.28	10.12	7.27	0.69	9.52
5	35.32	3.87	10.96	2.42	0.32	13.35	12.14	0.95	7.80	5.16	0.35	6.85
6	64.01	2.41	3.77	1.52	0.11	7.34	18.28	2.45	13.38	3.46	0.42	12.18
7	15.27	0.93	6.07	5.06	0.69	13.56	7.09	0.35	4.93	2.78	0.33	11.74
8	5.53	0.64	11.59	2.84	0.35	12.39	12.72	1.36	10.70	4.34	0.54	12.40
9	37.14	1.87	5.03	7.18	0.96	13.36	6.87	0.60	8.73	5.30	0.74	13.91
10	10.04	1.26	12.51	3.57	0.39	10.95	14.54	0.86	5.95	5.51	0.47	8.53
11	15.24	1.97	12.92	1.61	0.15	9.22	11.01	1.05	9.57	4.86	0.48	9.84
12	126.13	1.23	0.97	1.29	0.17	12.87	26.01	3.64	13.98	2.42	0.18	7.46
13	11.13	1.70	15.27	2.92	0.24	8.29	18.78	1.43	7.60	6.77	0.54	8.00
14	11.56	1.71	14.79	1.24	0.06	4.95	8.55	0.32	3.76	3.72	0.29	7.71
15	29.42	4.05	13.77	2.87	0.09	3.03	20.54	0.86	4.21	6.39	0.67	10.41
16	33.09	2.23	6.73	2.93	0.28	9.65	7.34	0.98	13.40	3.76	0.56	14.89
17	51.40	3.96	7.70	7.20	1.05	14.61	26.06	1.76	6.77	7.68	0.76	9.91
18	17.84	2.33	13.07	3.23	0.13	3.96	3.00	0.39	13.00	1.88	0.21	11.26
19	9.89	1.45	14.63	2.15	0.05	2.20	3.96	0.48	12.12	2.39	0.16	6.59
20	58.13	3.31	5.70	2.66	0.19	7.20	20.57	2.49	12.10	2.95	0.21	7.29
21	96.85	5.05	5.22	1.90	0.14	7.64	30.01	3.39	11.30	8.41	0.52	6.14
22	8.80	1.78	20.19	2.48	0.10	4.04	11.32	0.87	7.67	3.67	0.50	13.64
23	61.82	4.12	6.66	4.20	0.42	10.08	22.68	1.95	8.60	7.55	0.74	9.75
24	24.63	4.02	16.32	2.25	0.06	2.87	3.52	0.47	13.49	2.79	0.18	6.33
25	15.52	1.88	12.12	2.30	0.12	5.07	2.99	0.39	12.94	2.49	0.19	7.71

* Desviación estándar s²

** Coeficiente de variación (C.V) %

Tabla 63. Promedio de lecturas, desviación estándar y coeficiente de variación en Región II

No. Muestra	Fósforo			Potasio			Calcio			Magnesio		
	\bar{x} (ppm)	S ^{2*}	C.V. ** (%)	\bar{x} (mmol/L)	S ^{2*}	C.V. ** (%)	\bar{x} (mmol/L)	S ^{2*}	C.V. ** (%)	\bar{x} (mmol/L)	S ^{2*}	C.V. ** (%)
1	3.79	1.00	26.54	3.13	0.20	6.53	19.27	2.65	13.76	5.59	0.37	6.65
2	57.14	4.18	7.32	3.38	0.31	9.11	30.79	1.95	6.32	5.52	0.61	11.06
3	6.76	1.25	18.45	6.77	0.31	4.59	33.06	1.42	4.28	5.91	0.37	6.19
4	8.67	1.57	18.12	6.08	0.50	8.15	24.48	2.13	8.69	4.62	0.25	5.36
5	5.85	1.13	19.34	6.29	0.31	4.96	34.35	1.82	5.31	4.95	0.33	6.72
6	28.87	3.40	11.77	3.62	0.30	8.26	18.67	2.26	12.10	3.48	0.14	4.12
7	199.91	11.45	5.73	2.21	0.13	5.98	33.61	4.72	14.06	13.01	1.02	7.87
8	2.80	0.67	23.90	0.60	0.06	9.48	12.35	1.70	13.74	2.27	0.30	13.21
9	25.06	2.71	10.83	1.66	0.06	3.43	2.23	0.18	8.13	1.71	0.23	13.47
10	62.26	4.61	7.40	4.52	0.44	9.71	12.64	0.96	7.59	4.12	0.56	13.66
11	48.03	4.89	10.18	6.55	0.19	2.90	9.21	1.27	13.79	4.67	0.64	13.67
12	18.02	3.11	17.25	1.17	0.04	3.44	21.07	1.59	7.57	6.14	0.81	13.16
13	10.17	1.17	11.52	0.51	0.04	8.23	12.49	1.51	12.13	6.23	0.89	14.35
14	28.25	2.02	7.15	7.73	0.30	3.91	31.72	1.13	3.58	13.63	1.30	9.55
15	6.23	1.03	16.50	9.22	0.06	0.64	12.19	1.63	13.34	2.60	0.22	8.57
16	27.32	1.24	4.53	2.68	0.13	4.98	18.86	1.42	7.54	4.68	0.46	9.91
17	6.60	0.48	7.28	8.03	0.10	1.23	12.49	1.63	13.02	4.29	0.56	12.98
18	36.02	2.24	6.23	3.02	0.09	3.13	27.83	1.02	3.68	4.28	0.16	3.85
19	30.33	2.77	9.12	7.20	0.07	0.98	44.42	2.73	6.14	9.95	0.77	7.79
20	55.57	4.22	7.60	3.13	0.20	6.53	46.05	2.25	4.88	9.49	0.71	7.51

* Desviación estándar s²

** Coeficiente de variación (C.V) %

Tabla 64. Promedio de lecturas, desviación estándar y coeficiente de variación en Región III

No. Muestra	Fósforo			Potasio			Calcio			Magnesio		
	\bar{x} (ppm)	S ^{2*}	C.V. ** (%)	\bar{x} (mmol/L)	S ^{2*}	C.V. ** (%)	\bar{x} (mmol/L)	S ^{2*}	C.V. ** (%)	\bar{x} (mmol/L)	S ^{2*}	C.V. ** (%)
1	37.58	6.19	16.47	5.90	0.75	12.73	54.07	1.88	3.47	14.88	0.31	2.09
2	110.22	19.73	17.90	4.22	0.61	14.46	29.91	1.42	4.76	10.07	0.97	9.63
3	153.54	15.61	10.17	7.73	0.78	10.05	87.43	6.65	7.61	21.38	0.98	4.59
4	27.77	3.69	13.29	9.20	1.07	11.66	51.38	4.06	7.91	20.62	1.02	4.93
5	15.15	2.43	16.01	7.63	0.16	2.12	32.19	1.65	5.13	12.03	0.76	6.31
6	37.28	5.21	13.98	6.61	0.88	13.27	40.82	4.06	9.95	15.19	1.38	9.12
7	61.13	8.12	13.28	3.05	0.38	12.45	32.27	2.38	7.37	8.09	0.36	4.43
8	38.92	4.25	10.91	1.62	0.23	13.98	41.78	1.24	2.97	8.80	0.67	7.64
9	11.65	1.18	10.14	3.92	0.53	13.55	38.86	1.59	4.09	7.44	0.58	7.83
10	30.52	3.49	11.44	1.08	0.09	7.89	19.33	0.59	3.07	4.24	0.41	9.63
11	128.98	2.41	1.87	5.64	0.26	4.56	37.10	1.02	2.76	10.44	0.45	4.28
12	25.76	3.90	15.13	4.71	0.66	14.07	37.99	3.40	8.95	11.96	0.72	5.99
13	17.55	1.23	7.03	5.56	0.17	3.09	44.85	1.93	4.29	8.00	0.67	8.37

* Desviación estándar s²

** Coeficiente de variación (C.V) %

Tabla 65. Promedio de lecturas, desviación estándar y coeficiente de variación en Región IV

No. Muestra	Fósforo			Potasio			Calcio			Magnesio		
	\bar{x} (ppm)	S ^{2*}	C.V. ** (%)	\bar{x} (mmol/L)	S ^{2*}	C.V. ** (%)	\bar{x} (mmol/L)	S ^{2*}	C.V. ** (%)	\bar{x} (mmol/L)	S ^{2*}	C.V. ** (%)
1	125.87	7.14	5.67	6.81	0.26	3.78	50.30	7.44	14.80	17.01	1.39	8.16
2	132.74	8.57	6.46	5.92	0.35	5.92	105.35	13.93	13.22	23.12	2.83	12.24
3	63.58	4.59	7.22	4.57	0.20	4.48	48.39	2.66	5.50	11.56	0.78	6.72
4	37.98	2.71	7.14	7.15	0.40	5.55	49.80	5.19	10.42	16.75	1.59	9.47
5	8.61	1.47	17.06	5.52	0.27	4.80	21.87	1.25	5.74	6.85	0.57	8.27
6	10.16	1.35	13.24	4.38	0.24	5.39	25.33	1.36	5.35	9.57	1.05	10.92
7	16.80	1.42	8.44	5.10	0.35	6.94	33.43	2.35	7.02	10.57	0.75	7.06
8	7.62	0.64	8.33	1.40	0.16	11.74	23.75	2.49	10.50	8.98	1.05	11.74
9	26.70	3.95	14.81	11.04	0.14	1.25	20.93	2.38	11.36	12.66	1.13	8.94
10	43.10	2.66	6.16	7.39	0.69	9.27	68.50	5.95	8.69	22.30	1.87	8.39
11	17.04	2.40	14.10	3.16	0.25	7.87	85.95	12.18	14.17	35.82	1.14	3.19
12	6.99	0.82	11.75	1.89	0.19	10.07	17.90	1.01	5.65	8.13	1.20	14.71
13	11.89	1.42	11.91	5.43	0.38	7.09	45.71	2.35	5.13	13.71	0.94	6.85
14	271.99	17.19	6.32	3.87	0.23	5.87	354.25	6.11	1.73	55.30	3.23	5.85
15	58.94	3.95	6.70	4.60	0.30	6.43	71.34	4.29	6.01	10.73	1.54	14.39

* Desviación estándar s²

** Coeficiente de variación (C.V) %

Tabla 66. Promedio de lecturas, desviación estándar y coeficiente de variación en Región V

No. Muestra	Fósforo			Potasio			Calcio			Magnesio		
	\bar{x} (ppm)	S ^{2*}	C.V. ** (%)	\bar{x} (mmol/L)	S ^{2*}	C.V. ** (%)	\bar{x} (mmol/L)	S ^{2*}	C.V. ** (%)	\bar{x} (mmol/L)	S ^{2*}	C.V. ** (%)
1	52.13	3.49	6.70	5.42	0.15	2.70	17.65	1.64	9.29	6.65	0.57	8.63
2	33.13	5.68	17.14	16.03	0.18	1.13	67.05	5.42	8.08	33.96	3.40	10.00
3	121.33	12.96	10.68	8.02	0.42	5.22	97.50	5.68	5.82	44.48	2.01	4.51
4	48.90	7.23	14.78	7.78	0.17	2.21	23.42	2.16	9.22	4.69	0.51	10.79
5	99.73	2.42	2.43	3.51	0.21	5.91	18.30	1.59	8.67	11.95	1.02	8.58
6	172.45	6.98	4.05	17.31	1.06	6.14	32.17	4.64	14.42	16.78	2.04	12.16
7	189.36	25.56	13.50	10.57	0.30	2.85	27.98	3.74	13.38	7.56	0.68	8.93
8	53.21	4.18	7.85	3.29	0.09	2.59	209.30	26.26	12.55	18.80	0.81	4.31
9	18.57	2.08	11.20	5.57	0.10	1.77	37.19	2.54	6.83	17.75	1.19	6.71
10	46.12	4.77	10.34	6.82	0.43	6.36	42.53	5.37	12.63	13.24	0.81	6.09
11	110.60	8.89	8.04	11.53	1.24	10.75	47.00	4.94	10.51	21.44	1.79	8.33
12	32.22	2.71	8.42	6.41	0.33	5.07	67.29	9.95	14.79	16.74	1.32	7.90
13	19.63	0.72	3.68	4.46	0.23	5.13	12.05	1.57	13.02	3.94	0.40	10.13
14	103.79	1.08	1.04	4.75	0.70	14.63	17.15	2.27	13.24	5.85	0.48	8.21
15	133.90	5.32	3.97	10.17	1.31	12.88	148.38	9.69	6.53	23.43	2.35	10.03
16	29.25	2.57	8.80	2.79	0.24	8.48	69.30	8.84	12.75	27.21	3.35	12.31
17	224.27	11.90	5.31	24.92	0.95	3.83	48.74	2.12	4.36	15.54	1.78	11.48
18	241.37	14.92	6.18	16.58	0.79	4.76	83.49	5.27	6.32	35.99	2.40	6.67
19	237.88	14.67	6.17	13.26	0.75	5.67	52.90	4.85	9.16	24.28	1.71	7.05
20	218.66	14.44	6.60	1.63	0.06	3.51	167.35	24.08	14.39	52.50	4.40	8.38
21	269.70	9.70	3.60	2.33	0.30	12.91	213.60	17.95	8.40	57.52	2.69	4.68
22	37.37	2.34	6.27	6.30	0.62	9.77	106.74	9.34	8.75	31.78	2.68	8.45
23	5.39	1.04	19.31	2.17	0.10	4.61	12.25	0.59	4.82	3.16	0.14	4.42
24	68.47	2.81	4.10	2.98	0.29	9.85	81.91	5.46	6.67	29.39	3.40	11.57
25	20.12	2.70	13.43	3.77	0.30	8.06	65.48	5.80	8.86	17.79	0.85	4.78
26	20.13	1.91	9.47	4.72	0.52	10.98	5.50	0.60	10.86	5.05	0.34	6.67
27	68.17	4.62	6.78	2.78	0.19	6.98	69.45	6.27	9.03	9.60	0.36	3.76
28	20.84	1.51	7.24	4.07	0.40	9.93	46.16	6.81	14.75	7.03	0.59	8.34
29	260.66	10.65	4.08	4.43	0.54	12.21	113.59	15.36	13.52	15.93	0.99	6.21
30	15.42	2.55	16.52	1.64	0.14	8.72	21.67	1.89	8.74	4.11	0.16	3.97
31	20.47	1.45	7.10	2.91	0.25	8.56	33.35	3.64	10.91	14.18	1.20	8.43
32	95.82	13.42	14.01	3.93	0.45	11.33	103.31	6.65	6.43	31.21	2.50	8.02
33	5.21	0.87	16.77	2.83	0.19	6.55	17.76	1.75	9.85	10.24	0.52	5.08
34	18.09	2.57	14.20	1.98	0.17	8.47	13.53	2.02	14.92	4.15	0.37	8.84

* Desviación estándar s²

** Coeficiente de variación (C.V) %

Tabla 67. Promedio de lecturas, desviación estándar y coeficiente de variación en Región VI

No. Muestra	Fósforo			Potasio			Calcio			Magnesio		
	\bar{x} (ppm)	S ^{2*}	C.V. ** (%)	\bar{x} (mmol/L)	S ^{2*}	C.V. ** (%)	\bar{x} (mmol/L)	S ^{2*}	C.V. ** (%)	\bar{x} (mmol/L)	S ^{2*}	C.V. ** (%)
1	3.24	0.75	23.14	0.71	0.06	8.37	22.60	2.94	13.01	11.34	0.39	3.47
2	19.95	2.78	13.94	2.63	0.23	8.60	32.70	1.73	5.30	13.54	0.99	7.32
3	18.31	1.76	9.59	1.21	0.05	3.79	3.77	0.55	14.55	2.97	0.31	10.26
4	6.72	1.96	29.19	1.45	0.02	1.15	37.20	1.67	4.49	11.60	0.36	3.06
5	9.22	2.08	22.60	1.25	0.11	8.89	28.26	2.15	7.60	6.48	0.27	4.17
6	8.72	0.86	9.90	2.65	0.11	3.99	24.22	2.25	9.28	11.85	0.48	4.06
7	11.88	2.00	16.80	2.58	0.31	11.94	35.62	2.23	6.26	13.13	1.17	8.93
8	14.47	1.71	11.80	1.67	0.02	1.04	7.45	1.02	13.68	3.32	0.20	6.01
9	8.57	0.55	6.37	2.04	0.12	5.88	28.49	2.16	7.57	7.86	0.93	11.85
10	14.22	1.04	7.30	1.83	0.21	11.28	35.27	3.11	8.83	13.38	1.63	12.19
11	10.24	1.81	17.68	4.59	0.35	7.52	23.06	2.42	10.49	12.98	1.19	9.15
12	10.47	1.88	17.98	2.00	0.26	13.20	9.56	0.58	6.07	5.58	0.49	8.79
13	8.61	0.43	5.04	1.79	0.06	3.43	7.38	0.54	7.35	2.84	0.17	6.03
14	16.74	1.13	6.76	3.54	0.30	8.58	26.94	1.48	5.50	8.12	0.53	6.55
15	17.22	1.99	11.58	4.26	0.14	3.29	21.38	1.06	4.95	9.32	0.84	8.98

* Desviación estándar s²

** Coeficiente de variación (C.V) %

Tabla 68. Promedio de lecturas, desviación estándar y coeficiente de variación en Región VII

No. Muestra	Fósforo			Potasio			Calcio			Magnesio		
	\bar{x} (ppm)	S ^{2*}	C.V. ** (%)	\bar{x} (mmol/L)	S ^{2*}	C.V. ** (%)	\bar{x} (mmol/L)	S ^{2*}	C.V. ** (%)	\bar{x} (mmol/L)	S ^{2*}	C.V. ** (%)
1	6.69	0.43	6.40	2.83	0.16	5.54	2.93	0.43	14.52	2.54	0.18	7.15
2	14.03	2.41	17.16	1.30	0.13	10.07	23.52	2.89	12.28	12.04	0.25	2.10
3	69.59	12.52	17.98	2.10	0.31	15.00	25.43	2.06	8.10	7.57	0.43	5.64
4	23.10	3.38	14.62	4.44	0.52	11.69	55.20	7.00	12.67	9.02	0.30	3.35
5	27.61	1.01	3.67	4.06	0.38	9.25	18.56	1.90	10.26	3.84	0.39	10.05
6	14.32	2.39	16.68	2.55	0.26	10.14	14.88	1.17	7.89	6.92	0.48	6.88
7	26.56	1.74	6.55	2.58	0.19	7.48	12.68	1.74	13.75	7.22	0.43	6.01
8	21.58	2.20	10.20	1.95	0.18	9.33	26.47	2.22	8.40	6.71	0.18	2.65
9	26.27	3.65	13.91	3.60	0.24	6.63	6.77	0.27	4.02	6.57	0.41	6.23
10	27.74	4.66	16.79	3.16	0.38	12.05	15.58	0.98	6.29	7.17	0.27	3.76
11	71.06	9.17	12.91	9.13	1.25	13.64	31.57	2.58	8.18	10.67	1.45	13.56
12	43.65	1.45	3.32	1.34	0.07	5.21	121.58	3.51	2.89	7.24	0.12	1.73
13	8.27	0.70	8.53	3.19	0.13	4.02	35.45	2.58	7.27	7.88	0.64	8.07
14	47.28	4.62	9.77	10.20	1.09	10.67	31.19	1.64	5.25	8.45	0.34	4.01
15	46.17	2.07	4.48	1.13	0.06	5.26	165.50	8.68	5.24	8.27	0.72	8.75
16	5.17	0.85	16.45	1.71	0.13	7.70	2.71	0.08	2.96	0.66	0.09	13.24
17	2.88	0.68	23.71	1.67	0.10	6.16	7.35	0.85	11.53	2.26	0.21	9.14
18	12.41	1.67	13.43	6.30	0.44	6.95	13.93	0.96	6.86	3.56	0.38	10.75
19	11.62	2.20	18.89	4.78	0.31	6.42	33.22	4.12	12.42	8.06	0.51	6.36
20	45.98	1.23	2.67	6.53	0.25	3.86	34.53	3.94	11.40	9.28	0.41	4.43
21	40.92	5.96	14.56	5.42	0.35	6.52	48.97	4.34	8.85	11.06	0.63	5.69
22	7.77	0.67	8.69	1.34	0.13	9.64	43.46	4.09	9.41	28.60	0.70	2.45
23	4.86	0.92	18.97	5.10	0.36	7.06	13.48	0.83	6.18	10.29	0.43	4.22

* Desviación estándar s²

** Coeficiente de variación (C.V) %

Tabla 69. Adsorción aparente del fósforo sobre las resinas de intercambio y su concentración final de equilibrio en solución para cada punto de evaluación.

Diferencia Co – Ce (mg/L)	Adsorción aparente q _e (mg/g)	Logaritmo log q _e	Logaritmo log Ce	Concentración en equilibrio k (v*(co-ce))^n
0.00	0.00	-	-	0.00
3.72	0.07	-1.16	0.11	0.26
8.21	0.15	-0.82	0.25	0.40
17.90	0.33	-0.48	0.32	0.60
37.16	0.69	-0.16	0.45	0.88
75.97	1.41	0.15	0.61	1.29
94.95	1.76	0.25	0.70	1.45
113.77	2.11	0.32	0.79	1.59
132.53	2.45	0.39	0.87	1.72
171.61	3.18	0.50	0.92	1.97
187.47	3.47	0.54	1.10	2.07

Tabla 70. Adsorción aparente del potasio sobre las resinas de intercambio y su concentración final de equilibrio en solución para cada punto de evaluación.

Diferencia Co – Ce (mg/L)	Adsorción aparente q _e (mg/g)	Logaritmo log q _e	Logaritmo log Ce	Concentración en equilibrio k (v*(co-ce))^n
0.00	0.00	-	-	0.00
33.75	0.63	-0.20	0.72	1.17
67.81	1.26	0.10	1.01	1.76
144.49	2.68	0.43	1.06	2.72
218.74	4.05	0.61	1.18	3.46
292.77	5.42	0.73	1.28	4.10
365.42	6.77	0.83	1.39	4.66
557.78	10.33	1.01	1.43	5.96
747.15	13.84	1.14	1.52	7.06
841.27	15.58	1.19	1.56	7.56
934.51	17.31	1.24	1.61	8.03

Tabla 71. Adsorción aparente del calcio sobre las resinas de intercambio y su concentración final de equilibrio en solución para cada punto de evaluación.

Diferencia Co – Ce (mg/L)	Adsorción aparente q _e (mg/g)	Logaritmo log q _e	Logaritmo log Ce	Concentración en equilibrio k (v*(co-ce))^n
0.00	0.00	-	-	0.00
452.85	8.39	0.92	1.67	6.92
931.17	17.24	1.24	1.84	10.57
1911.96	35.41	1.55	1.94	16.14
2282.20	42.26	1.63	2.07	17.90
2675.67	49.55	1.70	2.09	19.66
3457.52	64.03	1.81	2.15	22.86
3833.79	71.00	1.85	2.22	24.29
4819.28	89.25	1.95	2.26	27.78
5794.44	107.30	2.03	2.31	30.96
6777.41	125.51	2.10	2.35	33.95

Tabla 72. Adsorción aparente del magnesio sobre las resinas de intercambio y su concentración final de equilibrio en solución para cada punto de evaluación.

Diferencia Co – Ce (mg/L)	Adsorción aparente q _e (mg/g)	Logaritmo log q _e	Logaritmo log Ce	Concentración en equilibrio k (v*(co-ce))^n
0.00	0.00	-	-	0.00
54.55	1.01	0.00	0.80	1.59
109.62	2.03	0.31	1.08	2.50
227.95	4.22	0.63	1.18	4.03
341.97	6.33	0.80	1.36	5.26
457.53	8.47	0.93	1.46	6.36
574.75	10.64	1.03	1.52	7.38
814.36	15.08	1.18	1.57	9.26
930.90	17.24	1.24	1.62	10.11
1048.81	19.42	1.29	1.66	10.93
1166.45	21.60	1.33	1.70	11.71

J. Gráficas de extracción de fósforo

1. Región I

Figura 17. Extracción de fósforo en suelos de Región I por diferentes métodos

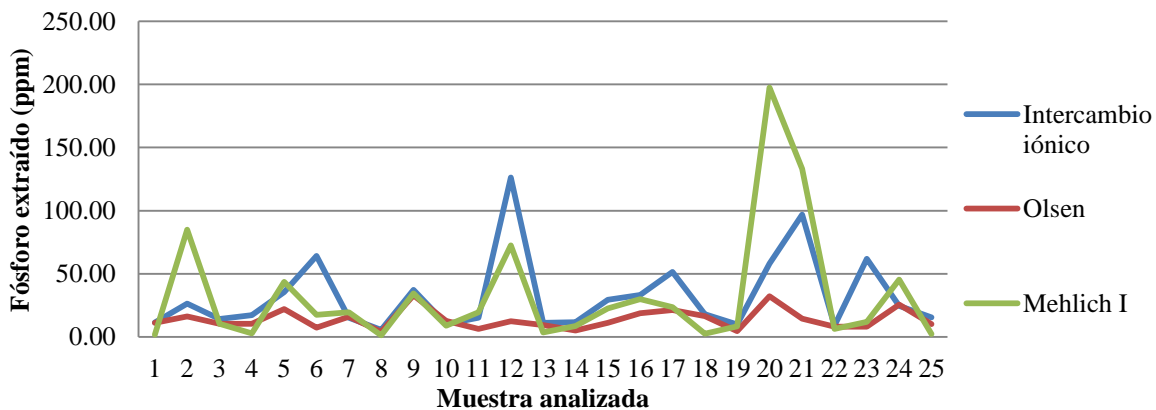


Figura 18. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región I

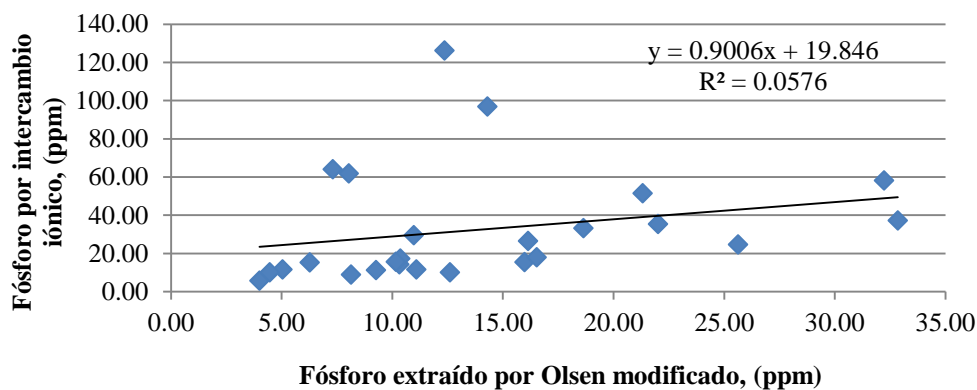


Figura 19. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región I

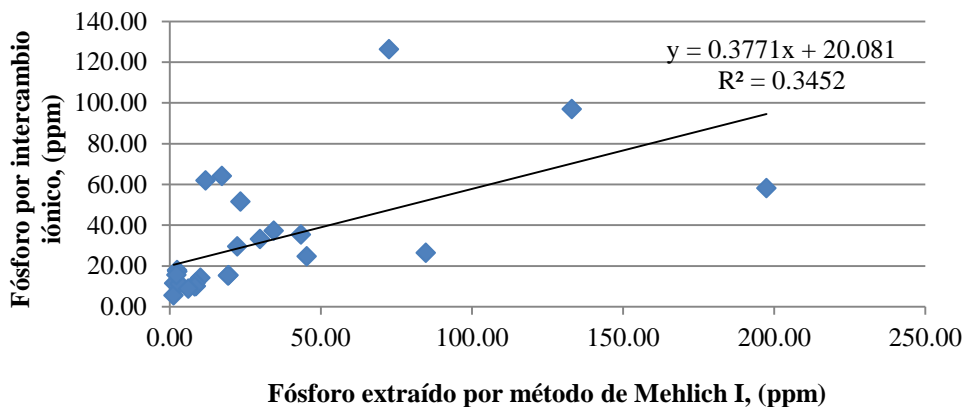
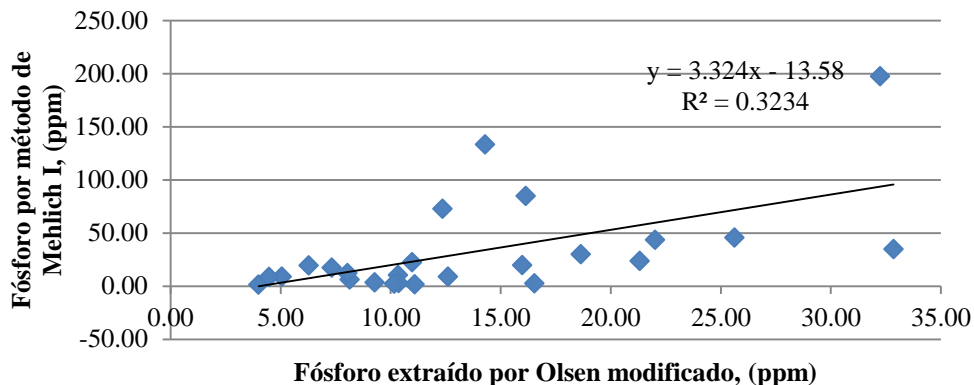


Figura 20. Extracción de fósforo por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región I



2. Región II

Figura 21. Extracción de fósforo en suelos de Región II por diferentes métodos

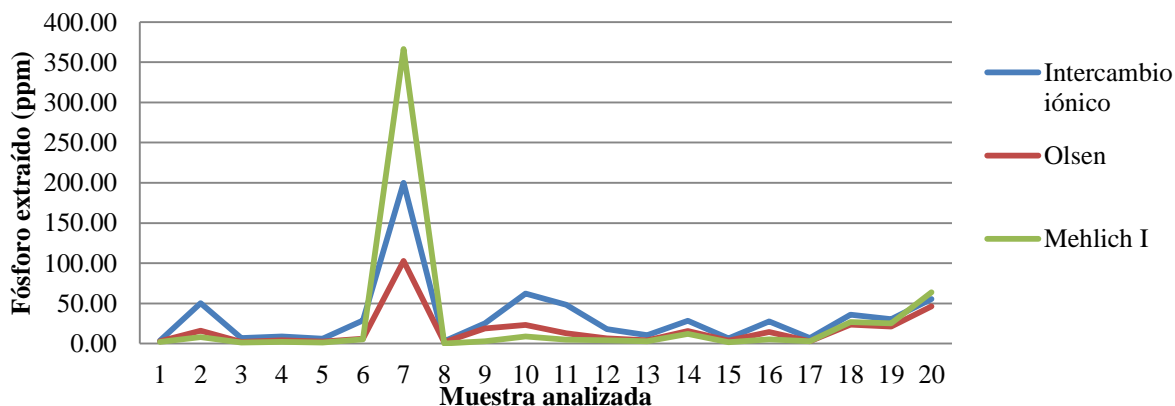


Figura 22. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región II

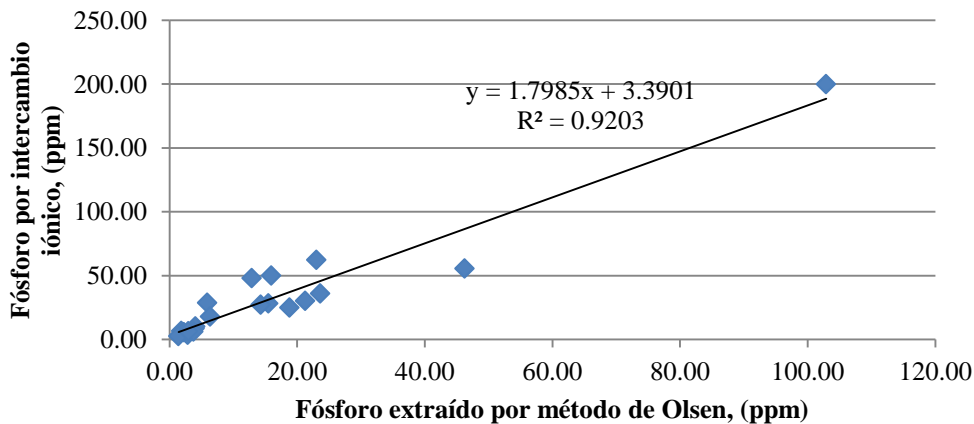


Figura 23. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región II

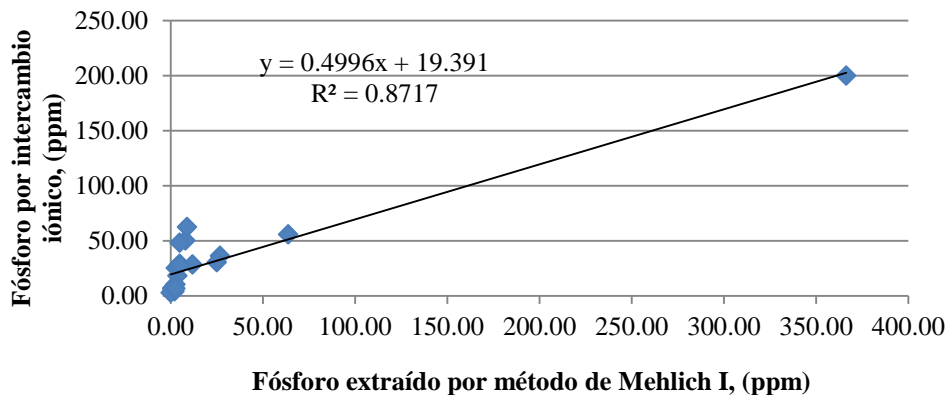
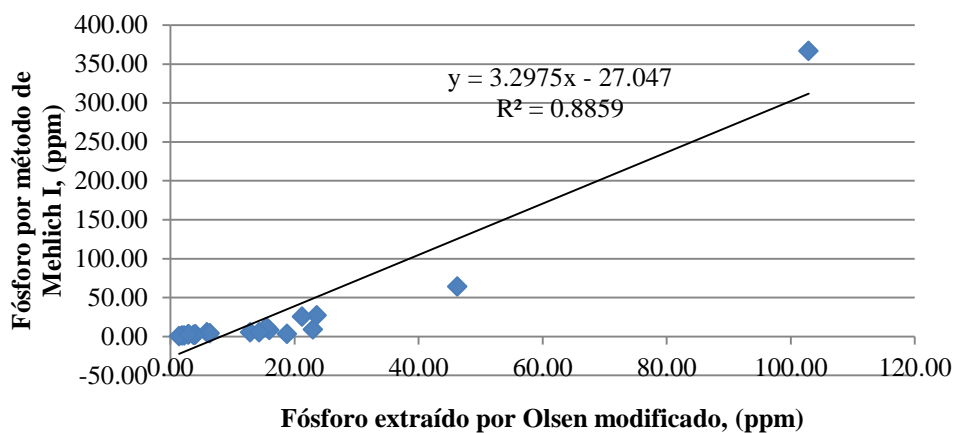


Figura 24. Extracción de fósforo por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región II



3. Región III

Figura 25. Extracción de fósforo en suelos de Región III por diferentes métodos

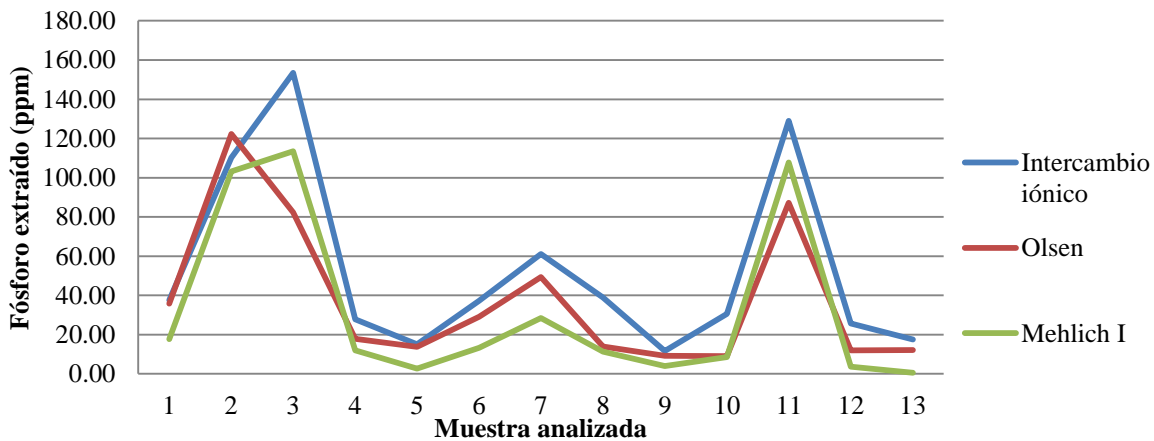


Figura 26. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región III

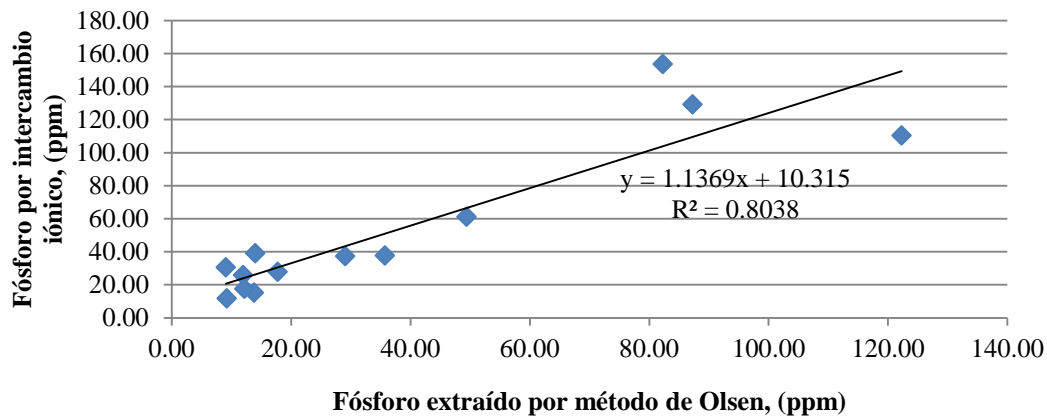


Figura 27. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región III

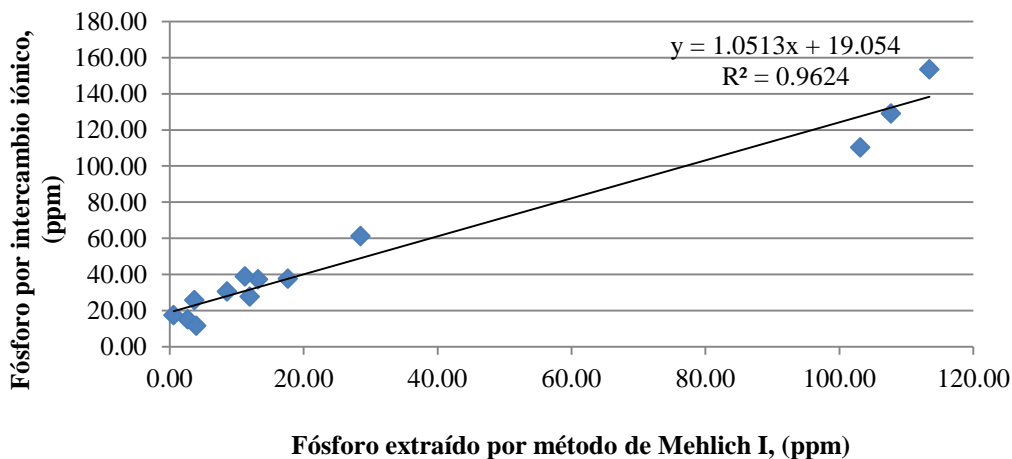
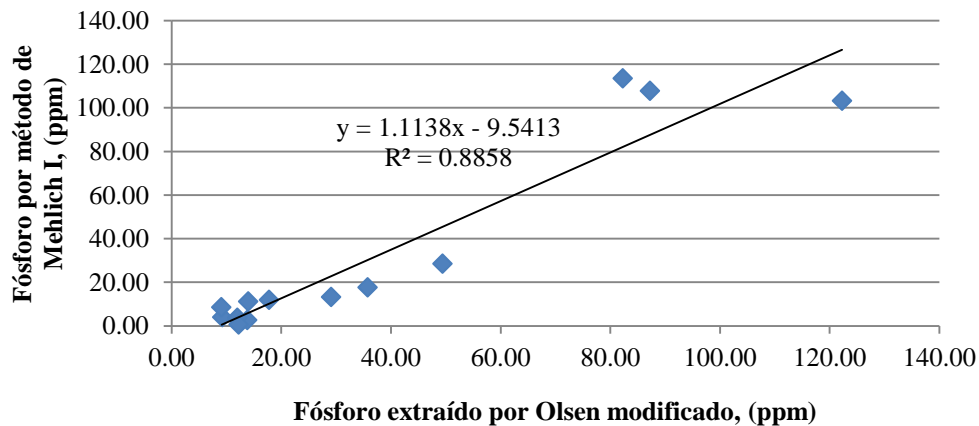


Figura 28. Extracción de fósforo por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región III



4. Región IV

Figura 29. Extracción de fósforo en suelos de Región IV por diferentes métodos

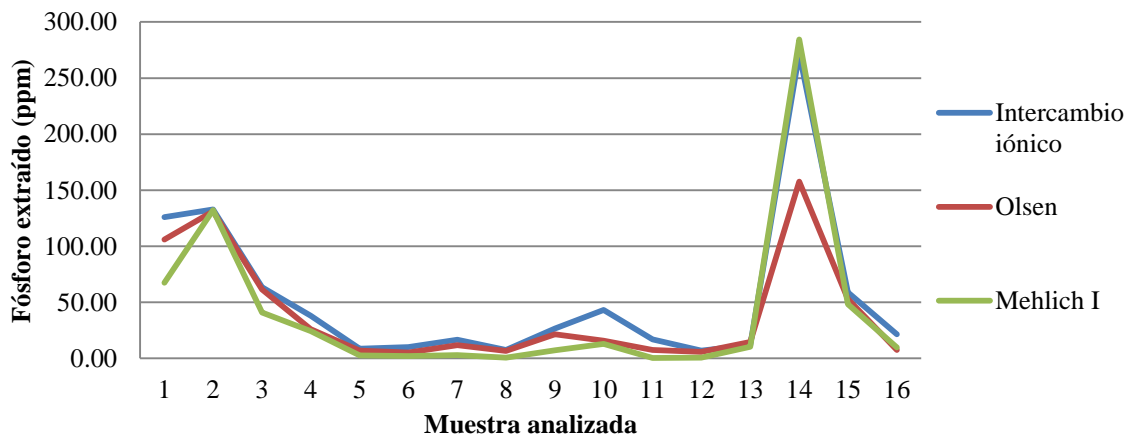


Figura 30. Extracción de fósforo intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región IV

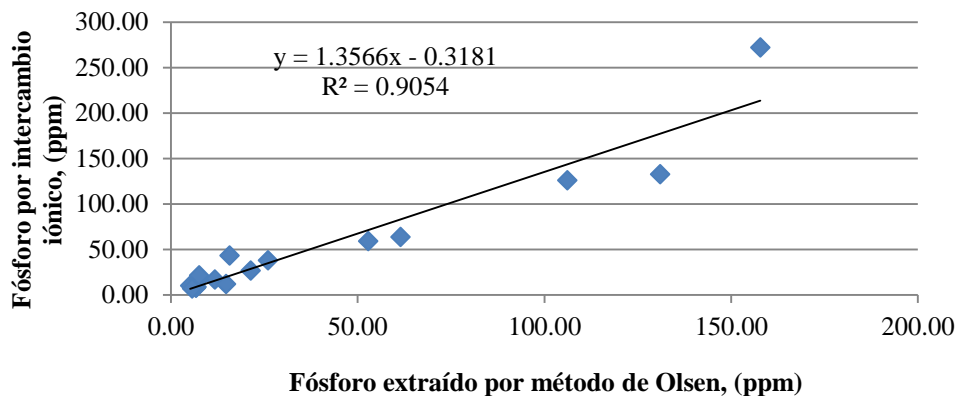


Figura 31. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región IV

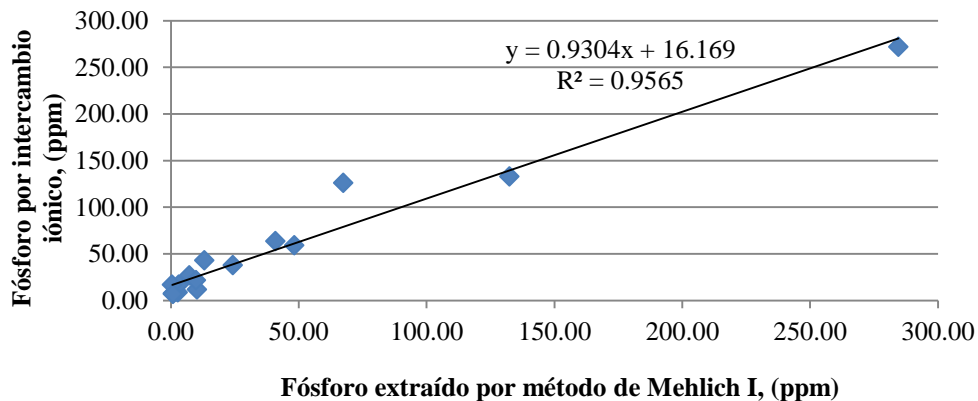
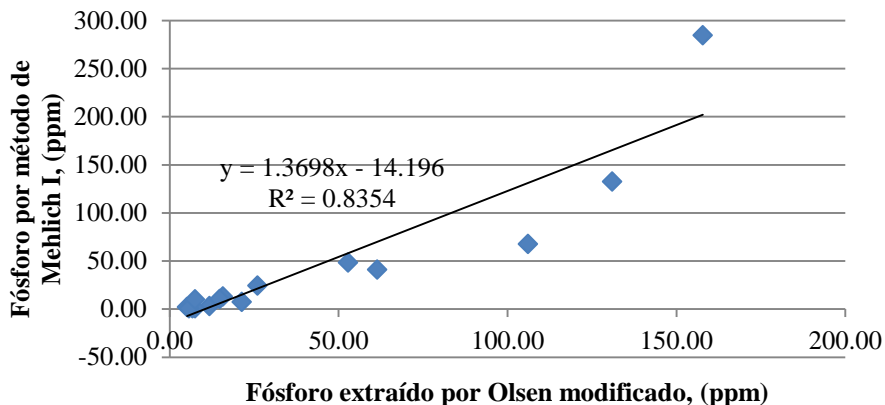


Figura 32. Extracción de fósforo por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región IV



5. Región V

Figura 33. Extracción de fósforo en suelos de Región V por diferentes métodos

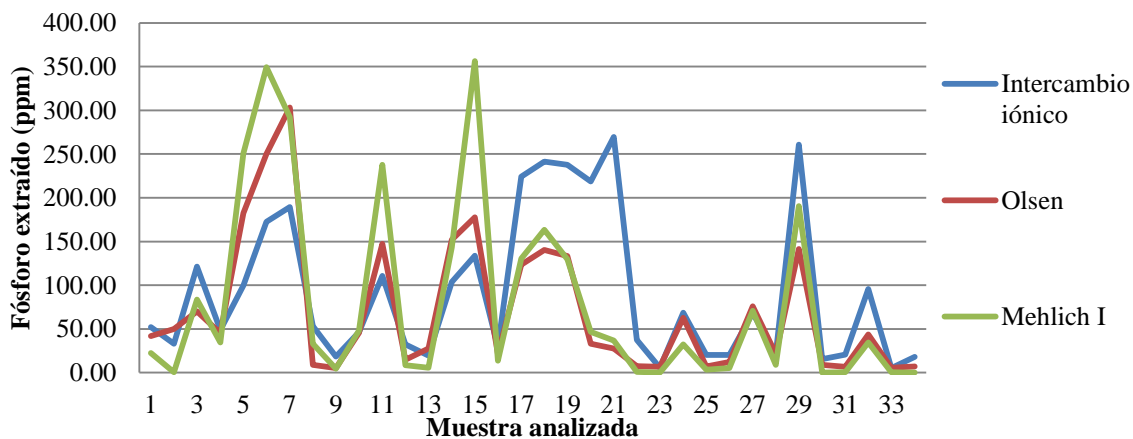


Figura 34. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región V

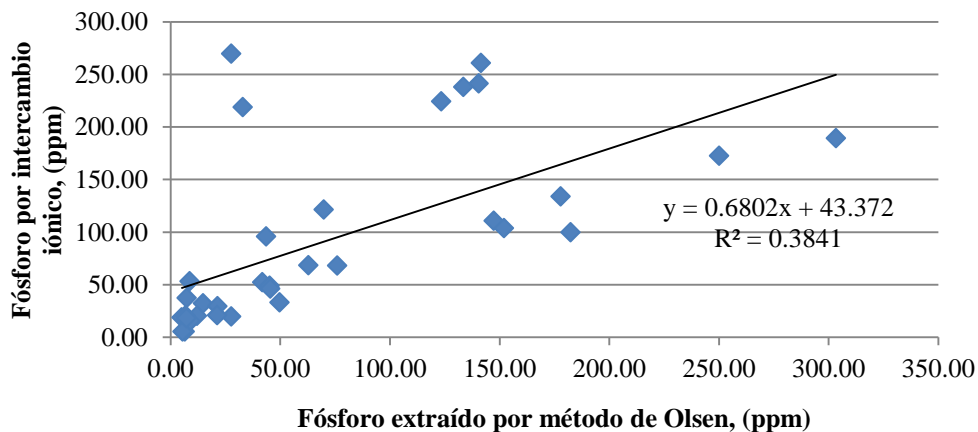


Figura 35. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región V

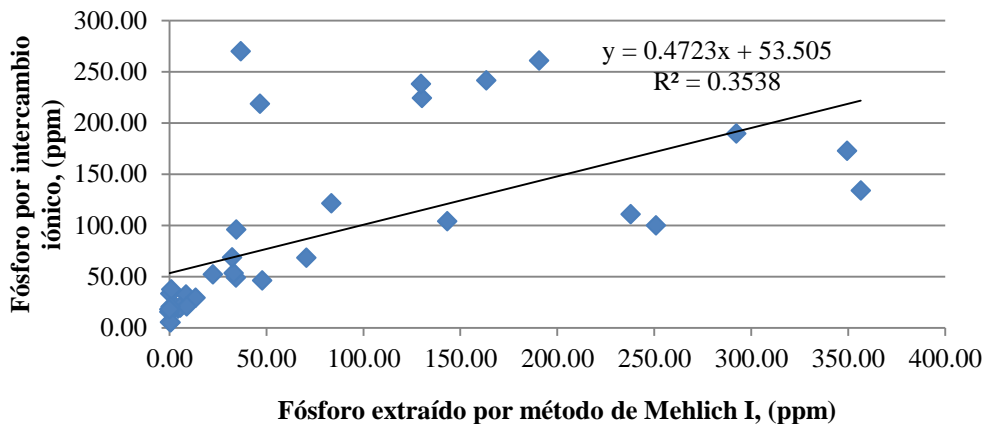
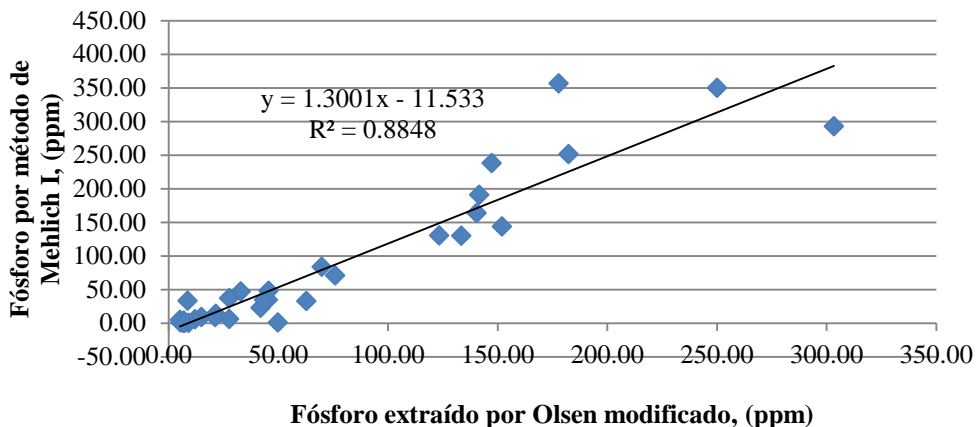


Figura 36. Extracción de fósforo por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región V



6. Región VI

Figura 37. Extracción de fósforo en suelos de Región VI por diferentes métodos

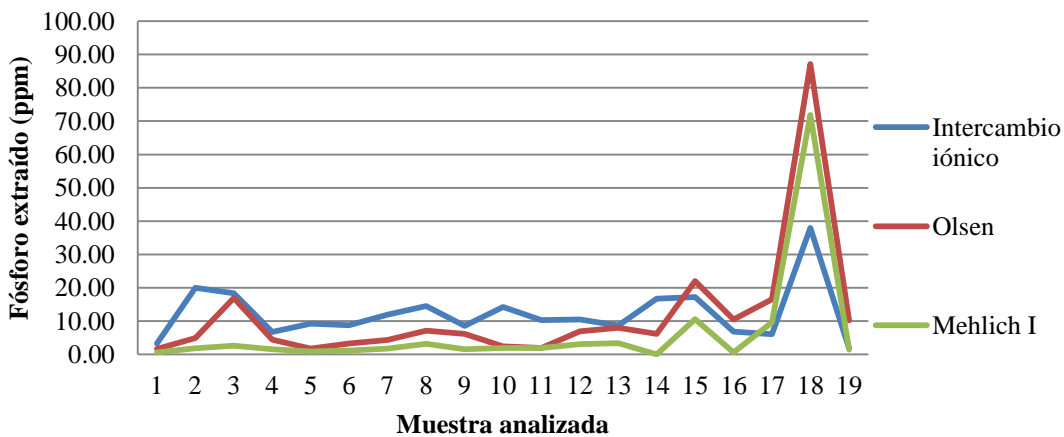


Figura 38. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región VI

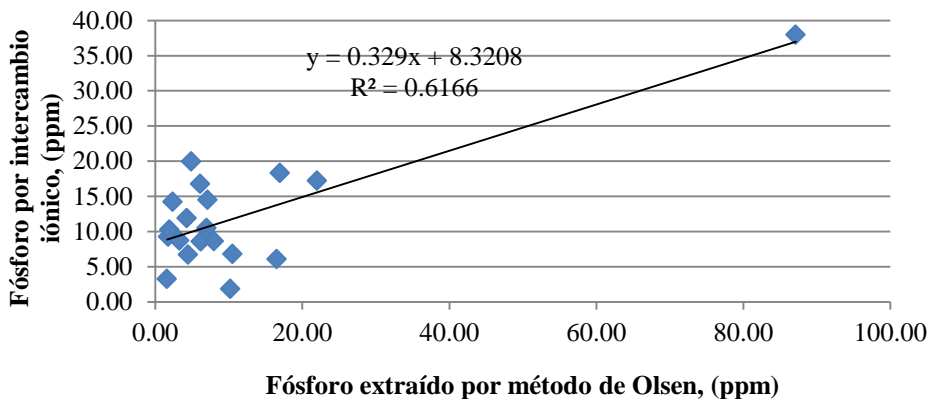


Figura 39. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región VI

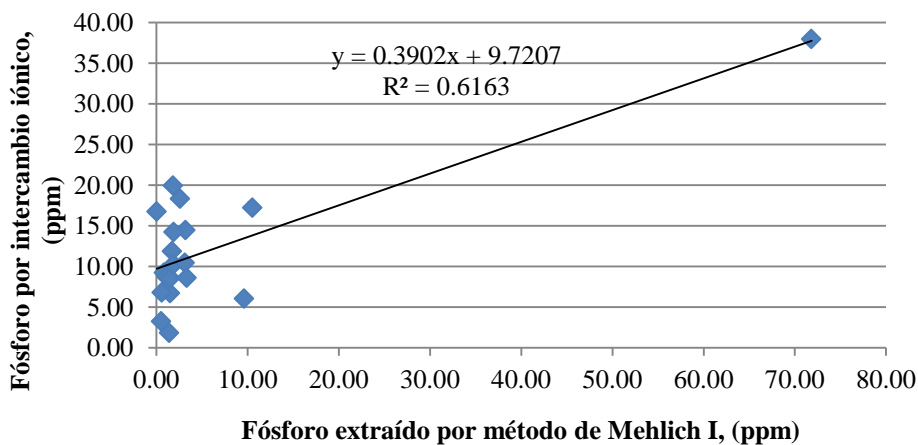
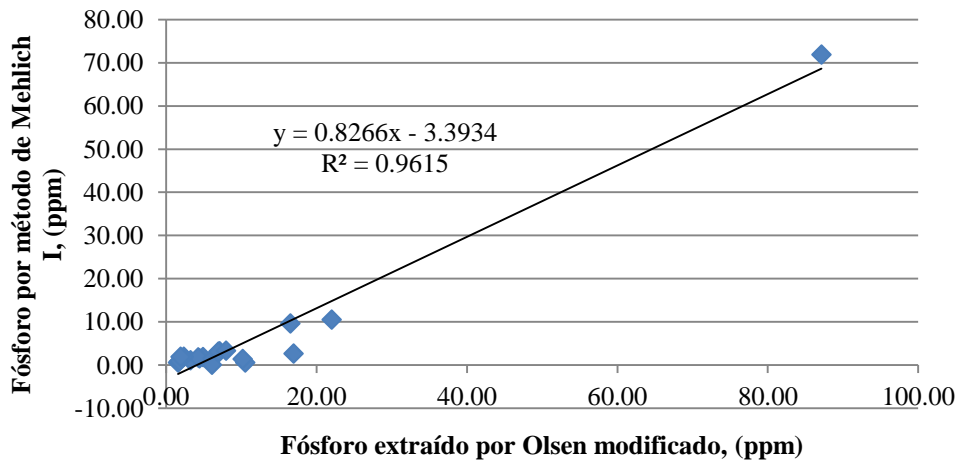


Figura 40. Extracción de fósforo por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región VI



7. Región VII

Figura 41. Extracción de fósforo en suelos de Región VII por diferentes métodos

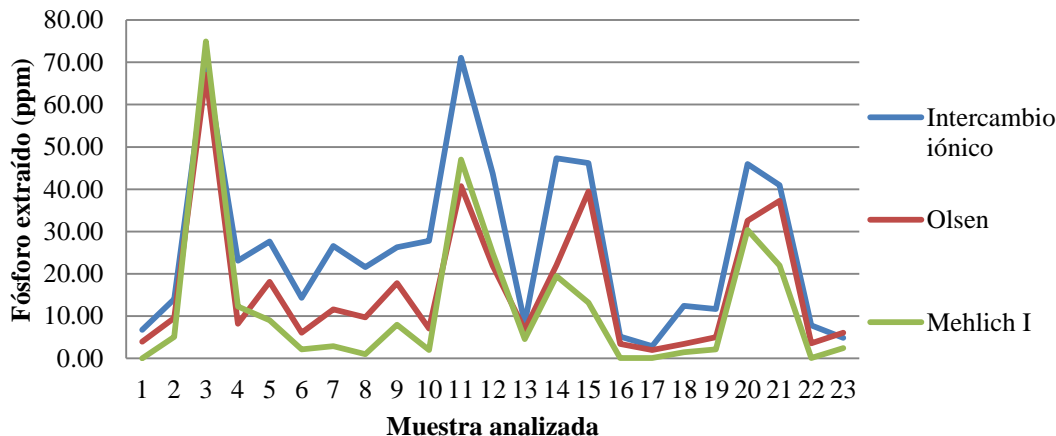


Figura 42. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región VII

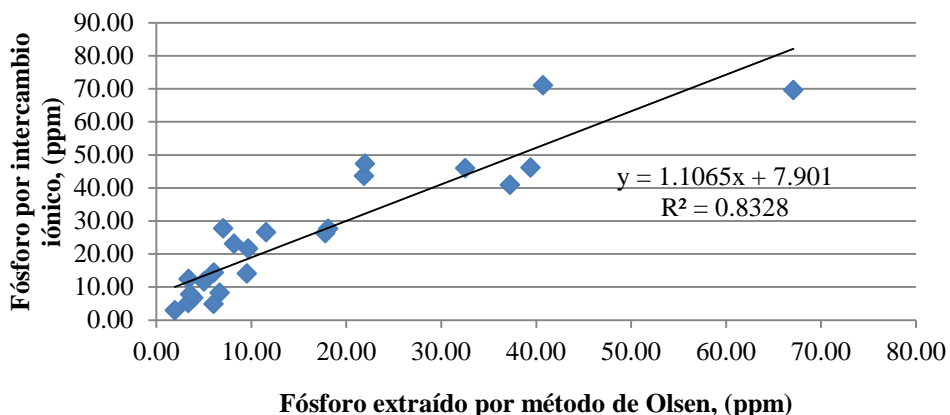


Figura 43. Extracción de fósforo por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región VII

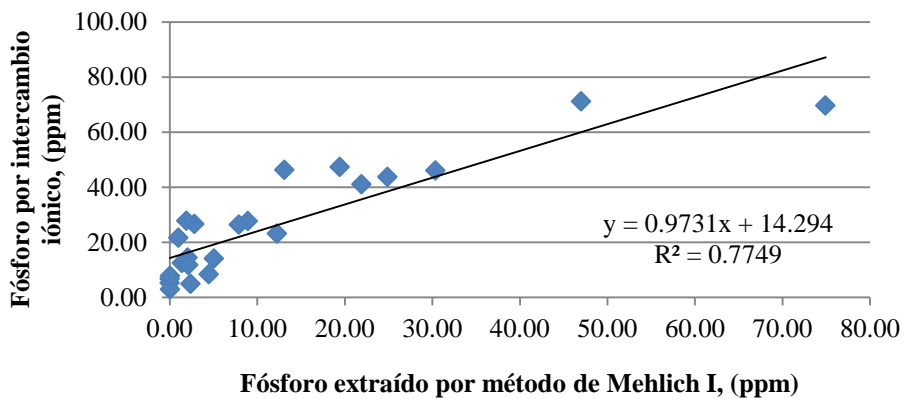
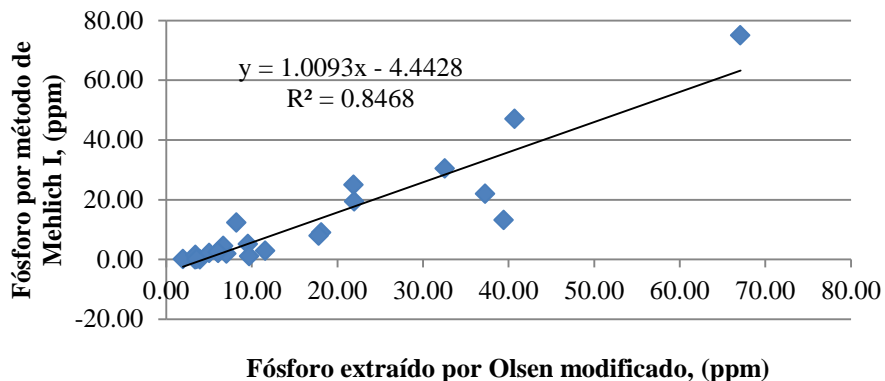


Figura 44. Extracción de fósforo por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región VII



K. Gráficas de extracción de potasio

1. Región I

Figura 45. Extracción de potasio en suelos de Región I por diferentes métodos

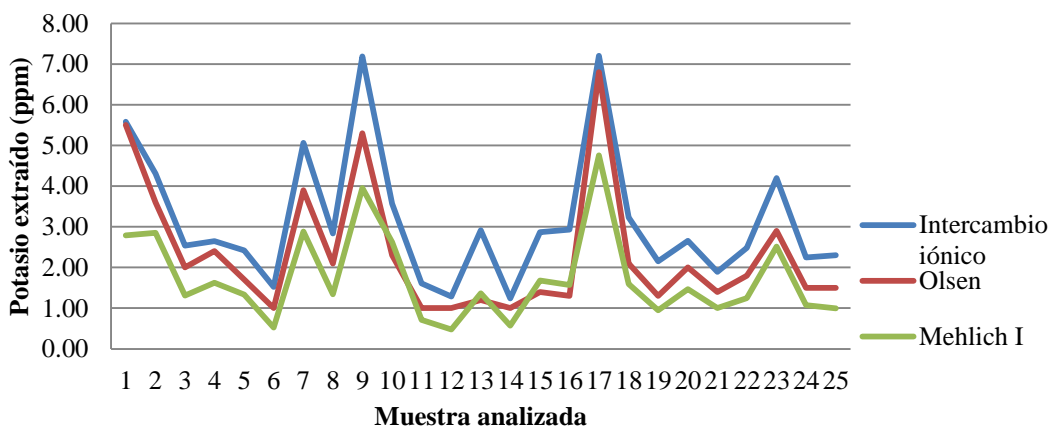


Figura 46. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región I

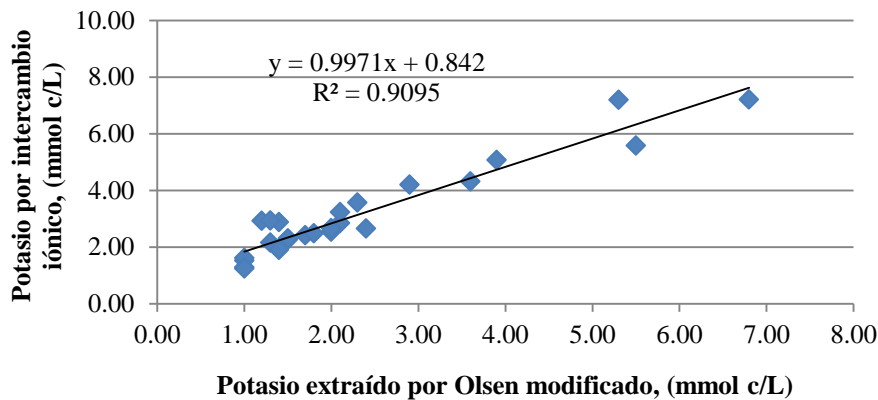


Figura 47. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región I

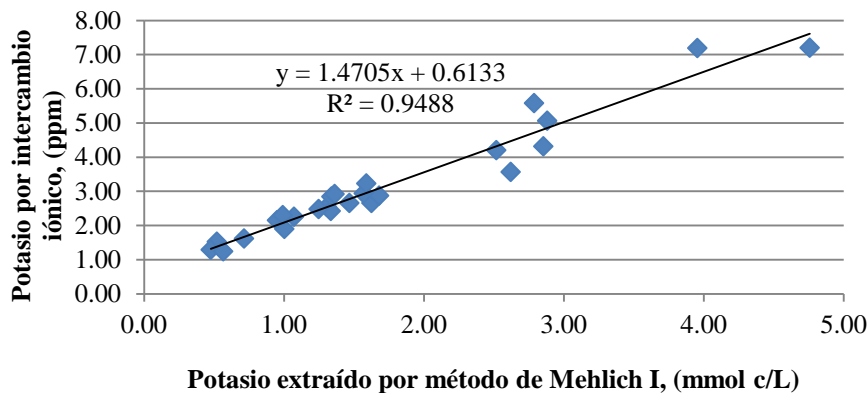
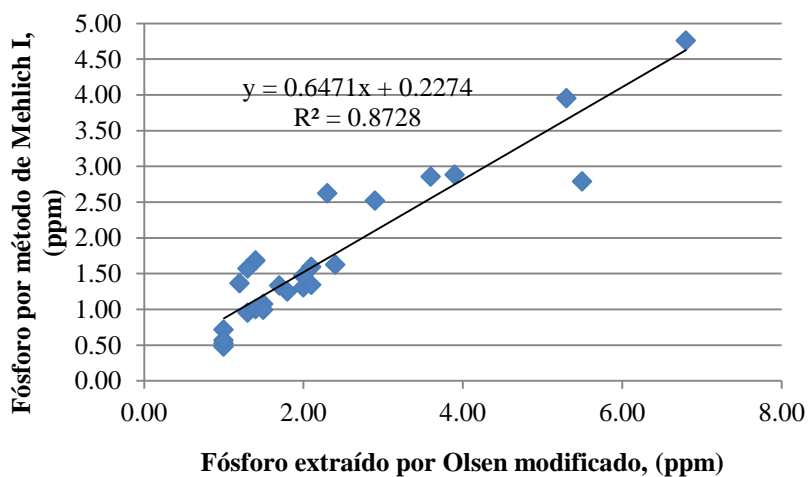


Figura 48. Extracción de potasio por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región I



2. Región II

Figura 49. Extracción de potasio en suelos de Región II por diferentes métodos

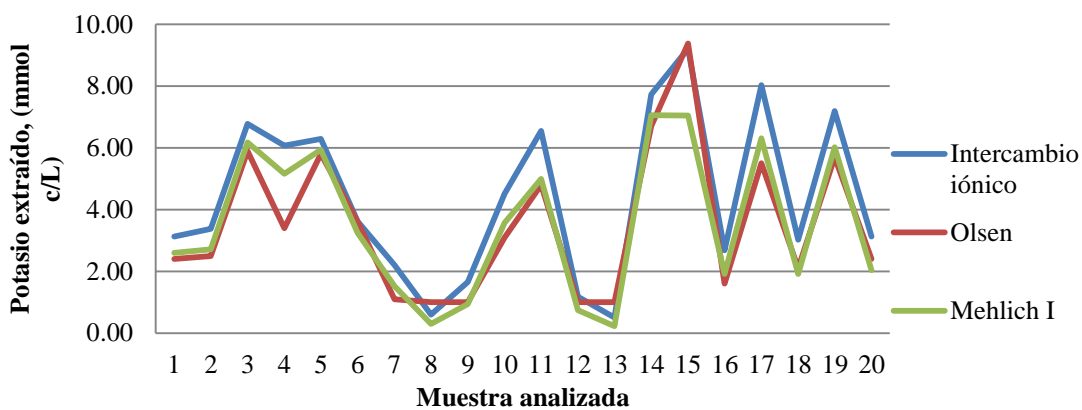


Figura 50. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región II

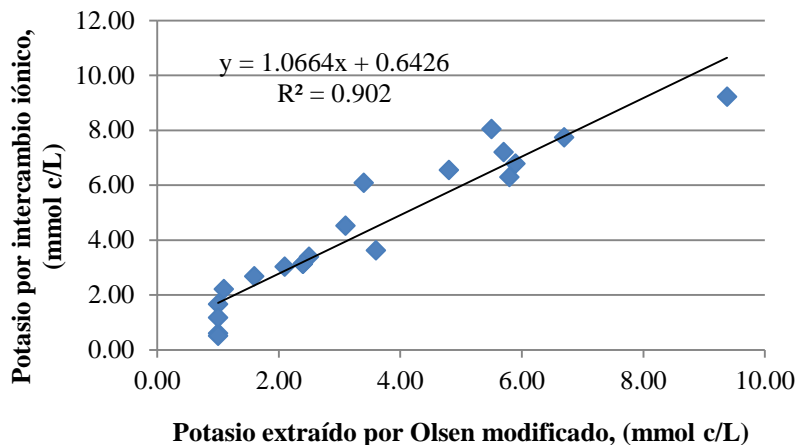


Figura 51. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región II

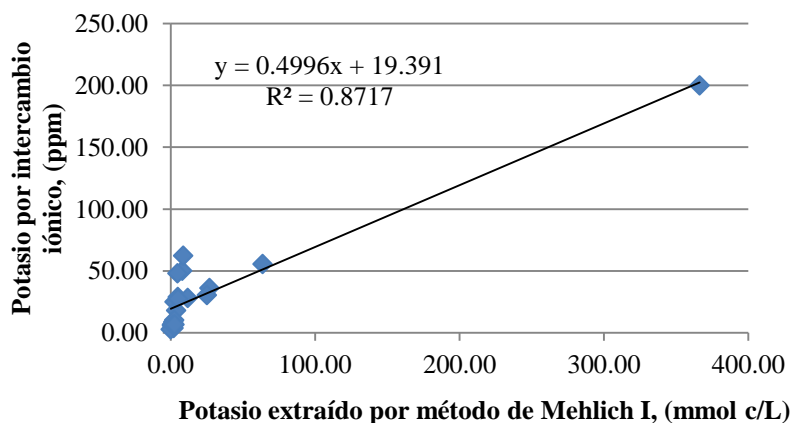
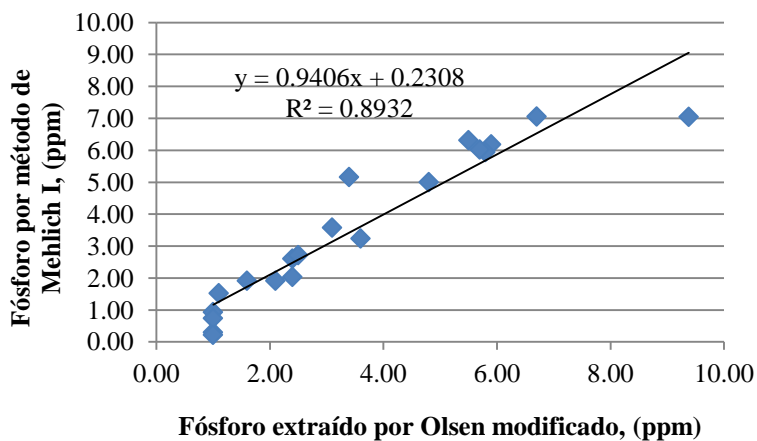


Figura 52. Extracción de potasio por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región II



3. Región III

Figura 53. Extracción de potasio en suelos de Región III por diferentes métodos

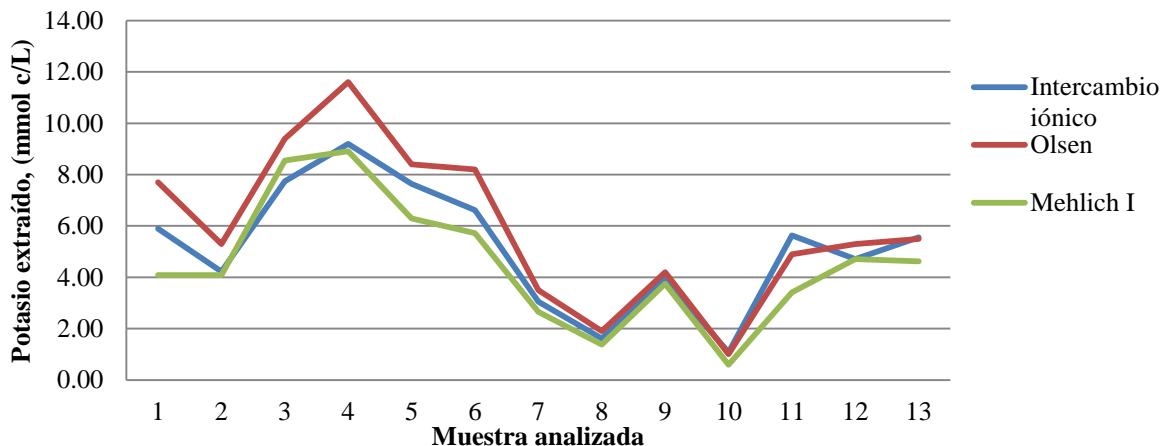


Figura 54. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región III

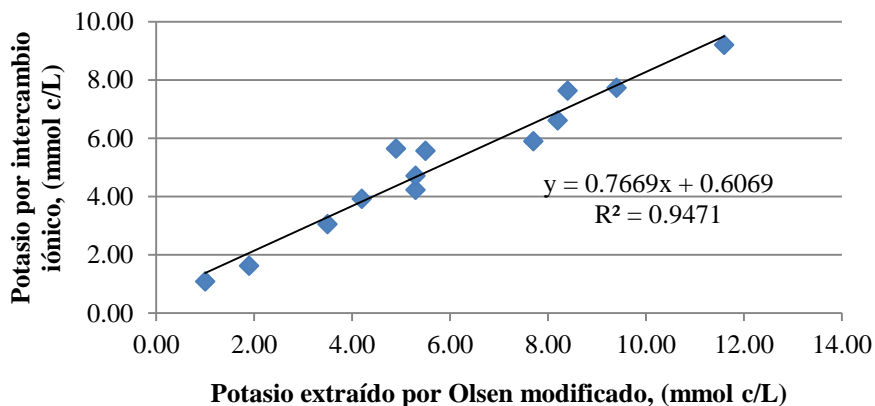


Figura 55. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región III

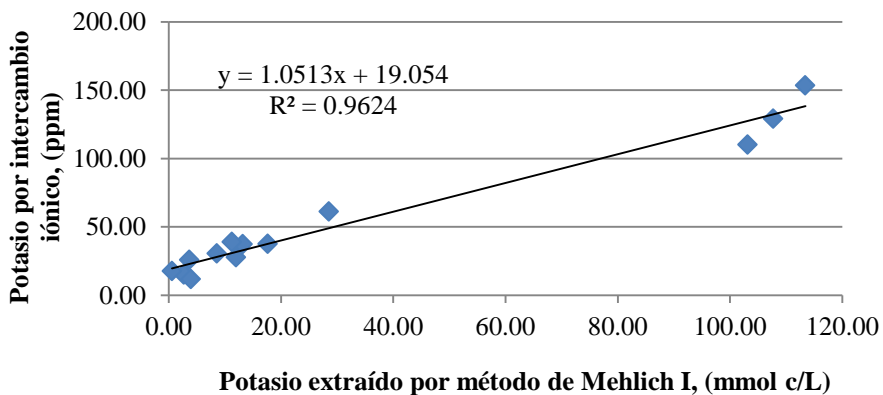
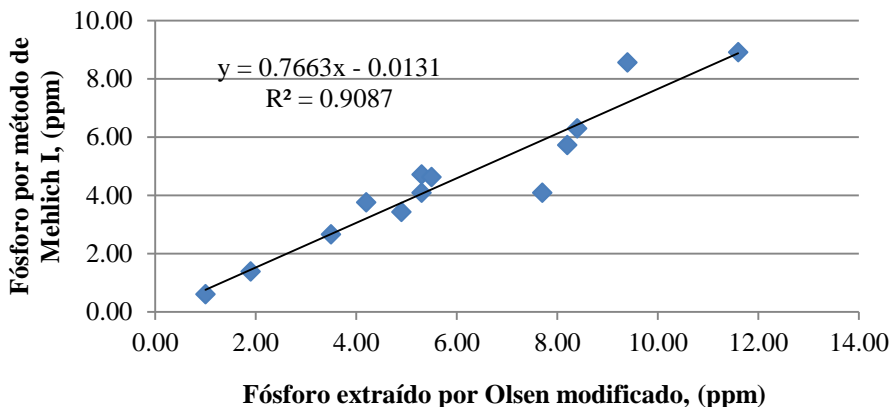


Figura 56. Extracción de potasio por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región III



4. Región IV

Figura 57. Extracción de potasio en suelos de Región IV por diferentes métodos

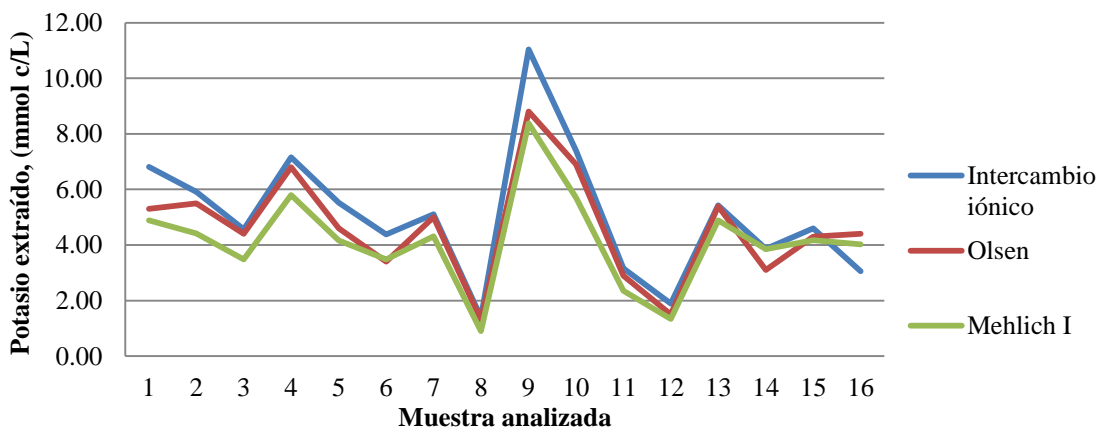


Figura 58. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región IV

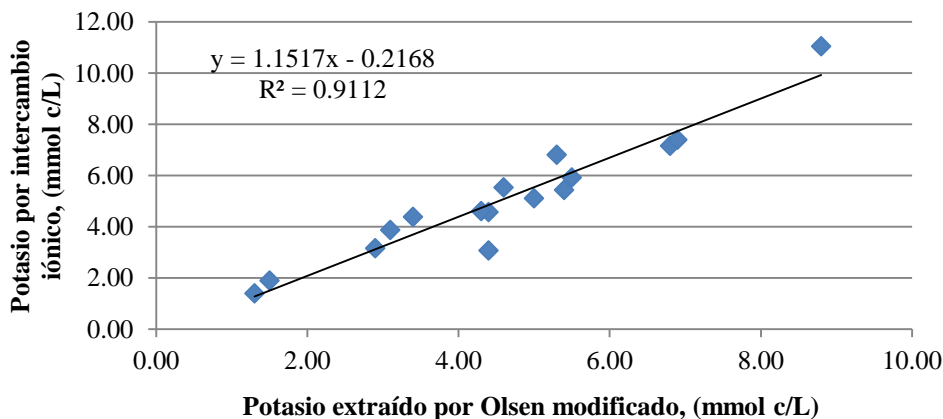


Figura 59. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región IV

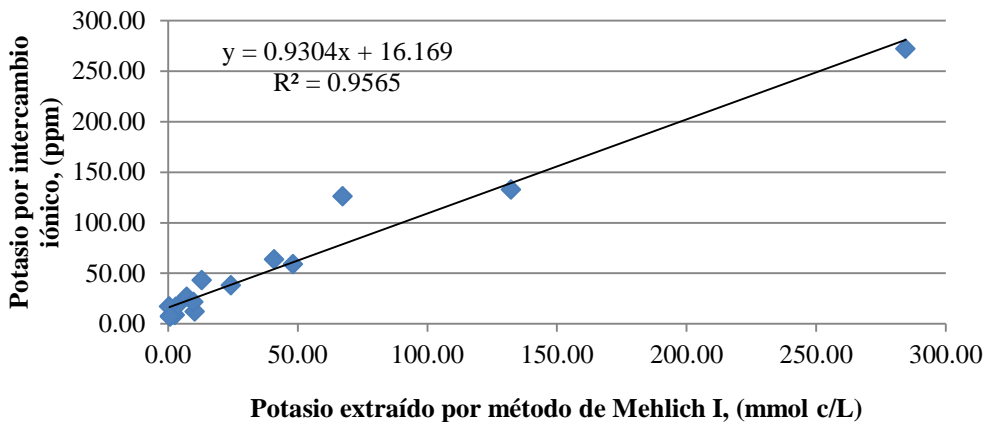
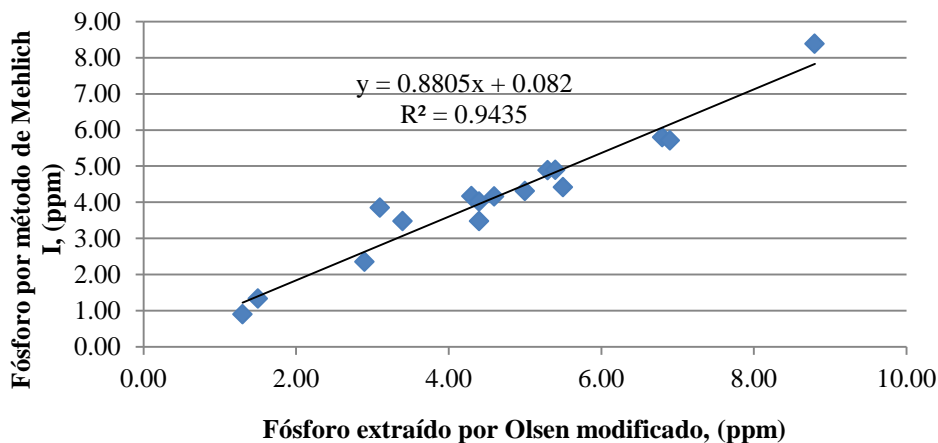


Figura 60. Extracción de potasio por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región IV



5. Región V

Figura 61. Extracción de potasio en suelos de Región V por diferentes métodos

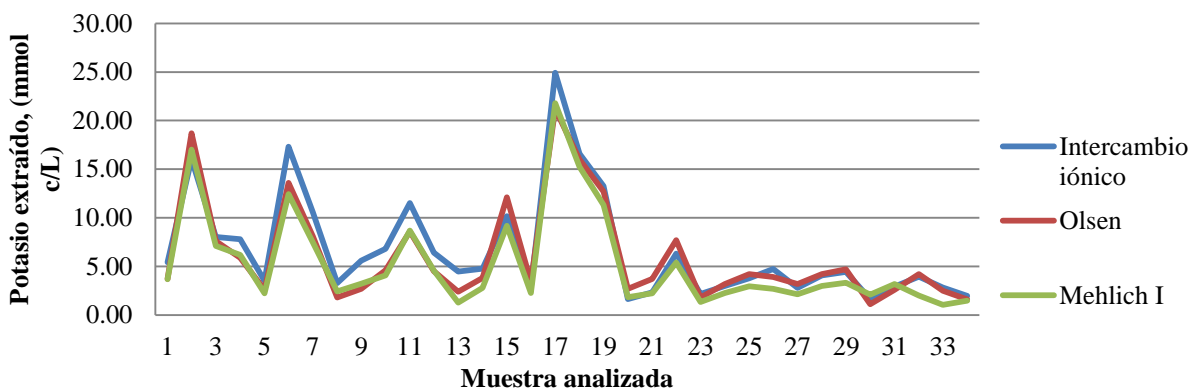


Figura 62. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región V

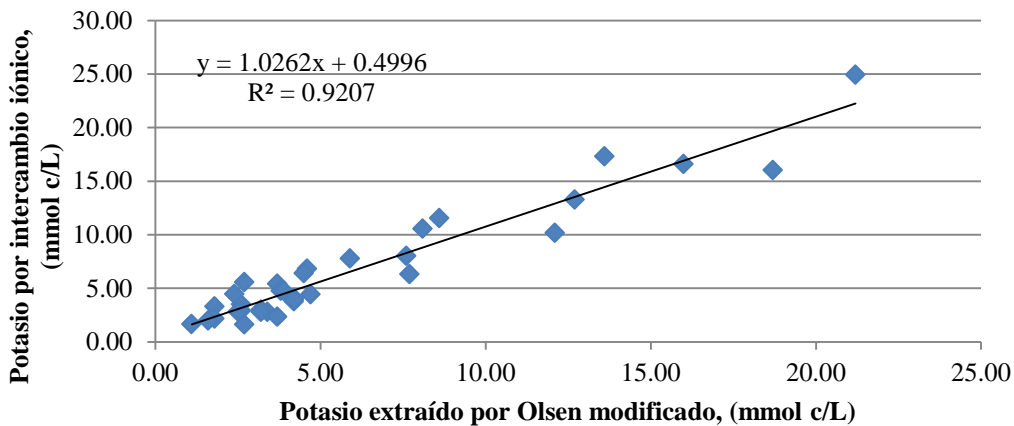


Figura 63. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región V

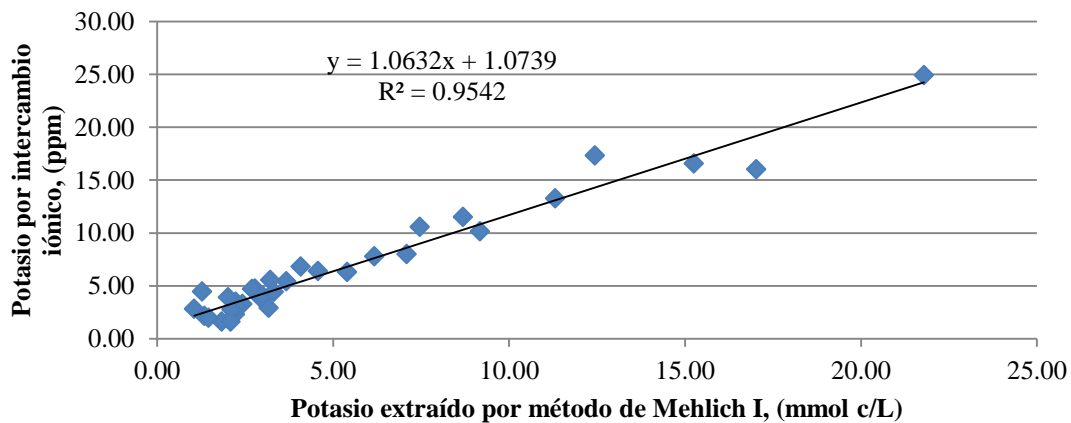
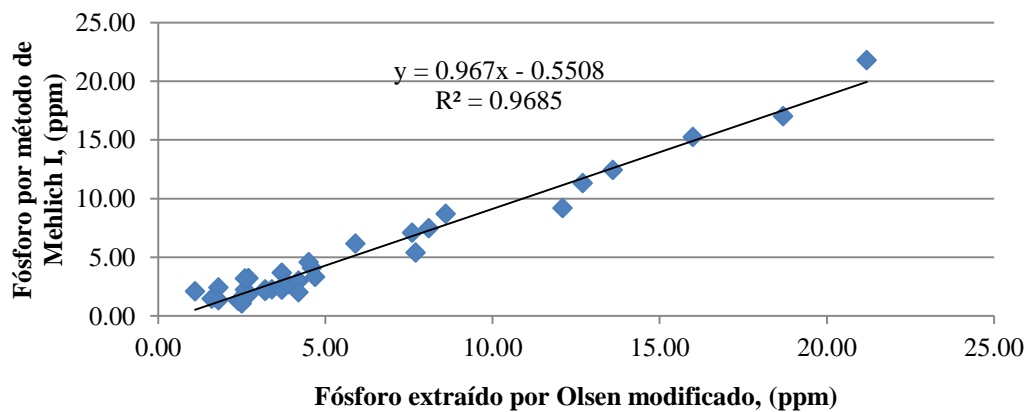


Figura 64. Extracción de potasio por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región V



6. Región VI

Figura 65. Extracción de potasio en suelos de Región VI por diferentes métodos

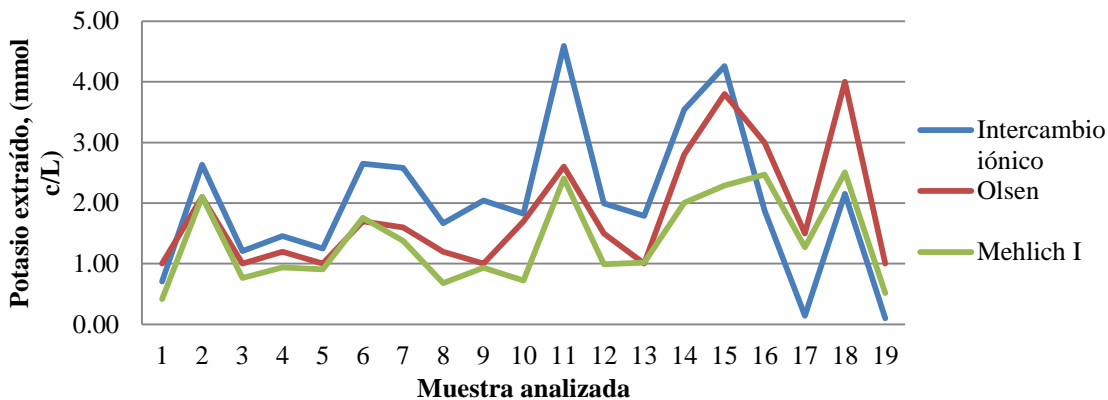


Figura 66. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región VI

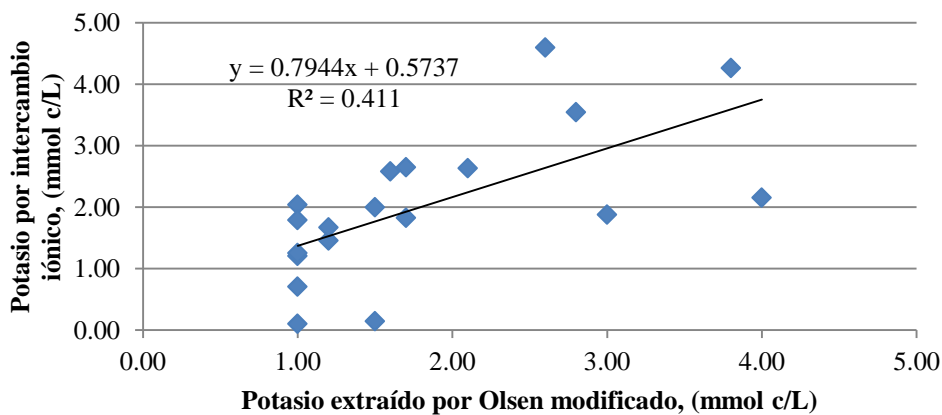


Figura 67. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región VI

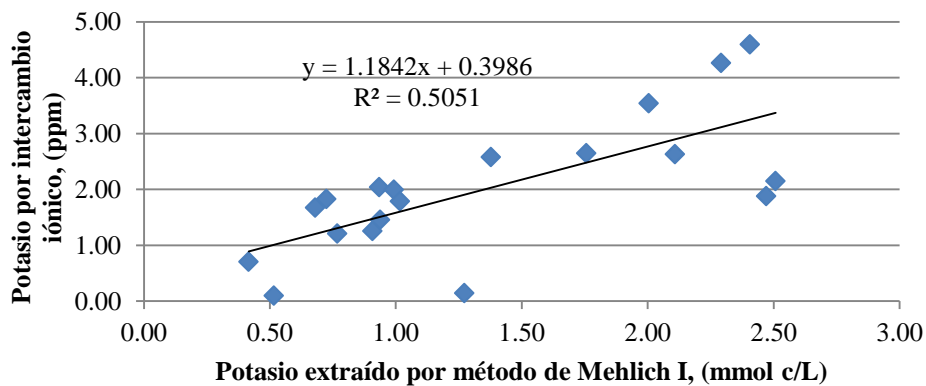
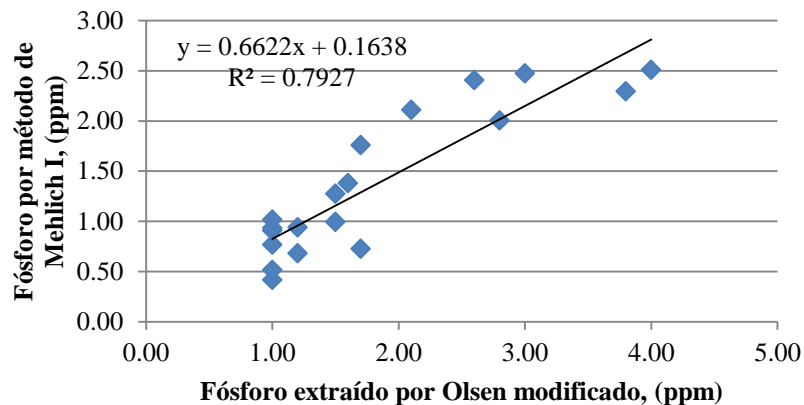


Figura 68. Extracción de potasio por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región VI



7. Región VII

Figura 69. Extracción de potasio en suelos de Región VII por diferentes métodos

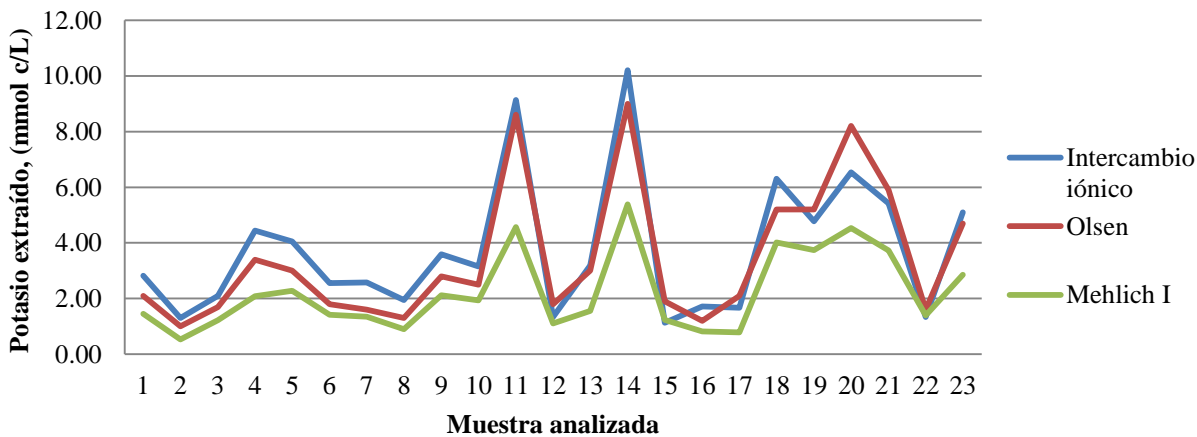


Figura 70. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Olsen modificado en Región VII

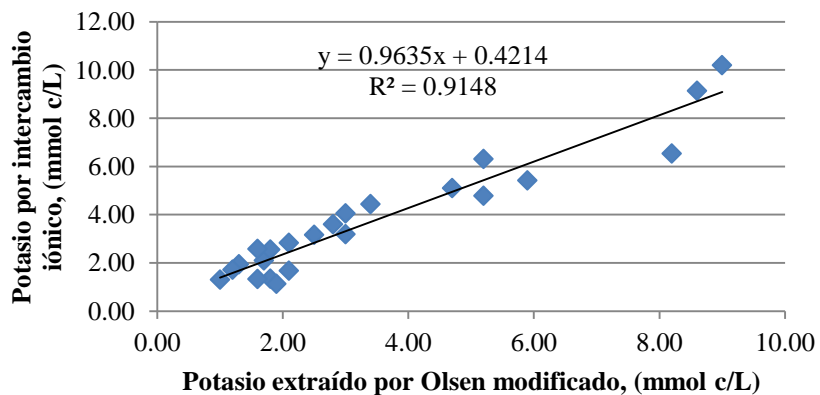


Figura 71. Extracción de potasio por intercambio iónico Vs. Mehlich I en Región VII

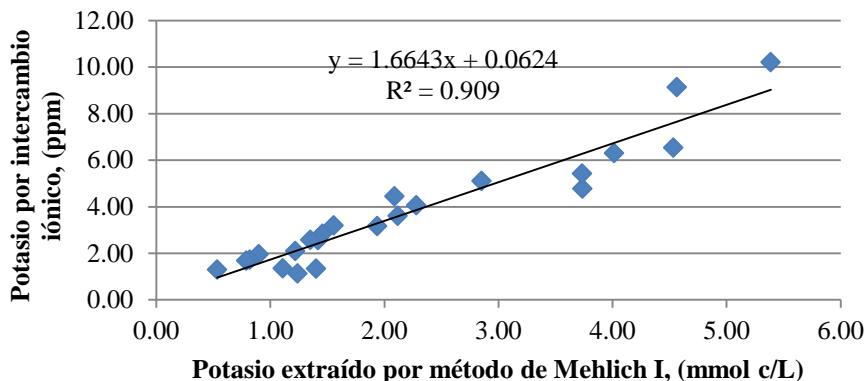
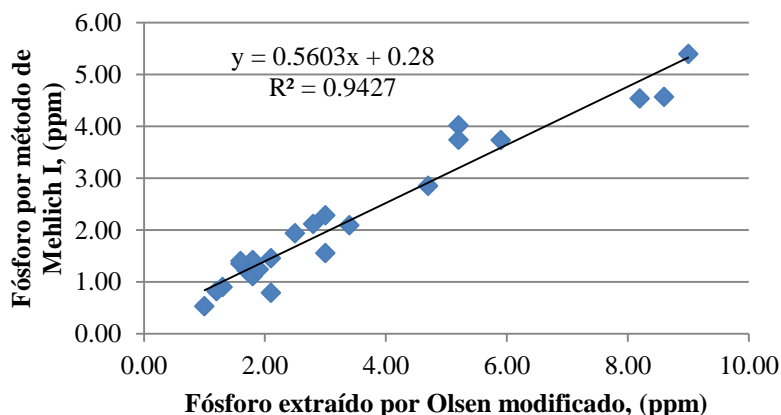


Figura 72. Extracción de potasio por Olsen Modificado Vs. Mehlich I en Región VII



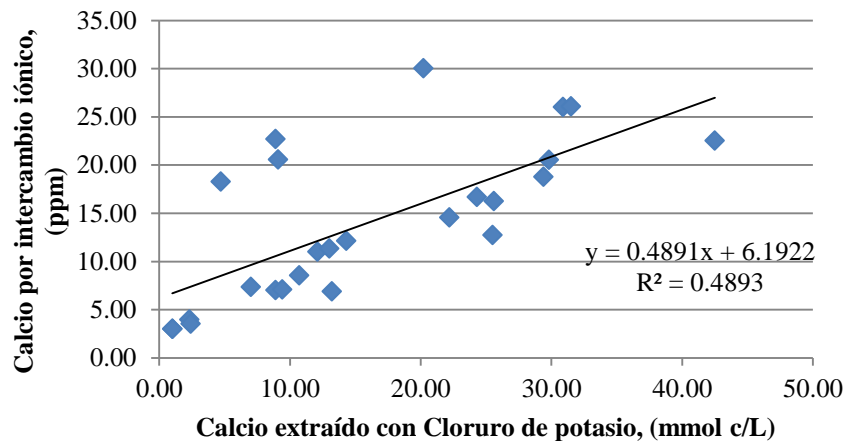
L. Gráficas de extracción de calcio

1. Región I

Figura 73. Extracción de calcio en suelos de Región I por diferentes métodos



Figura 74. Extracción de calcio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región I



2. Región II

Figura 75. Extracción de calcio en suelos de Región II por diferentes métodos

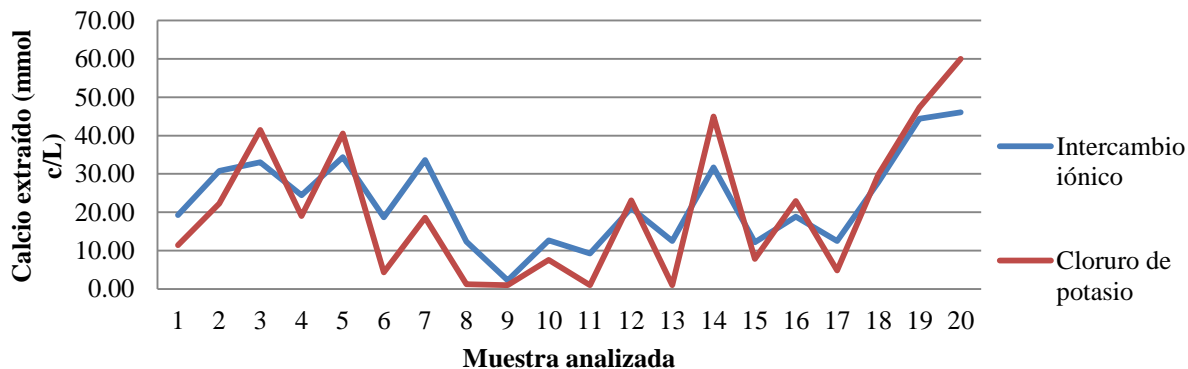
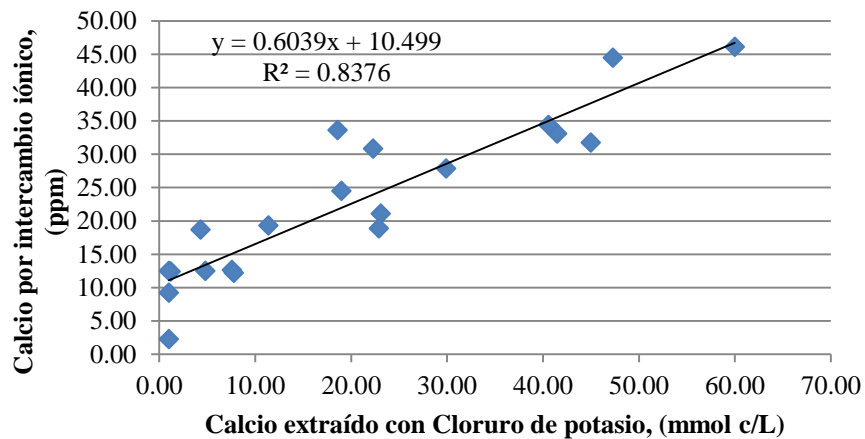


Figura 76. Extracción de calcio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región II



3. Región III

Figura 77. Extracción de calcio en suelos de Región III por diferentes métodos

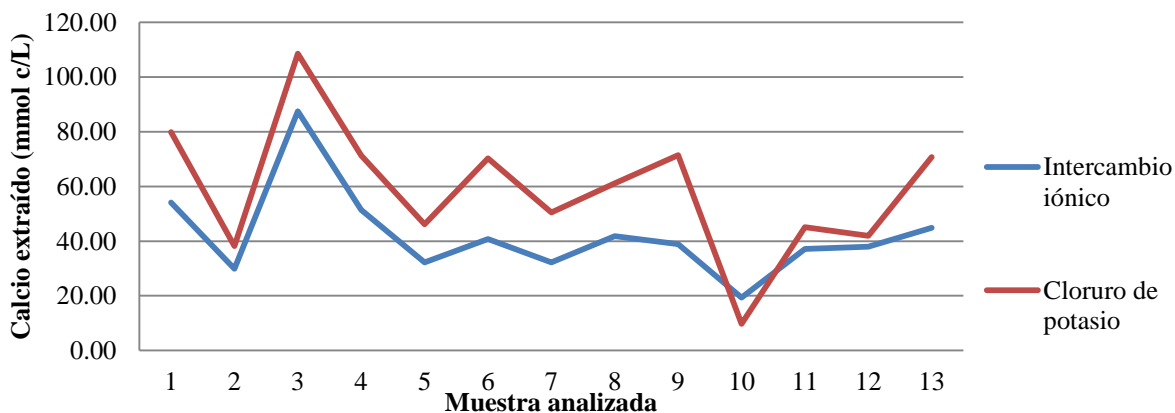
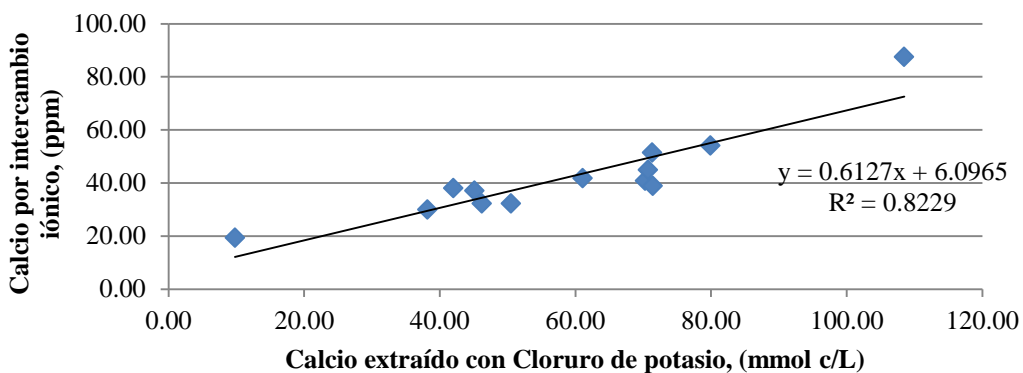


Figura 78. Extracción de calcio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región III



4. Región IV

Figura 79. Extracción de calcio en suelos de Región IV por diferentes métodos

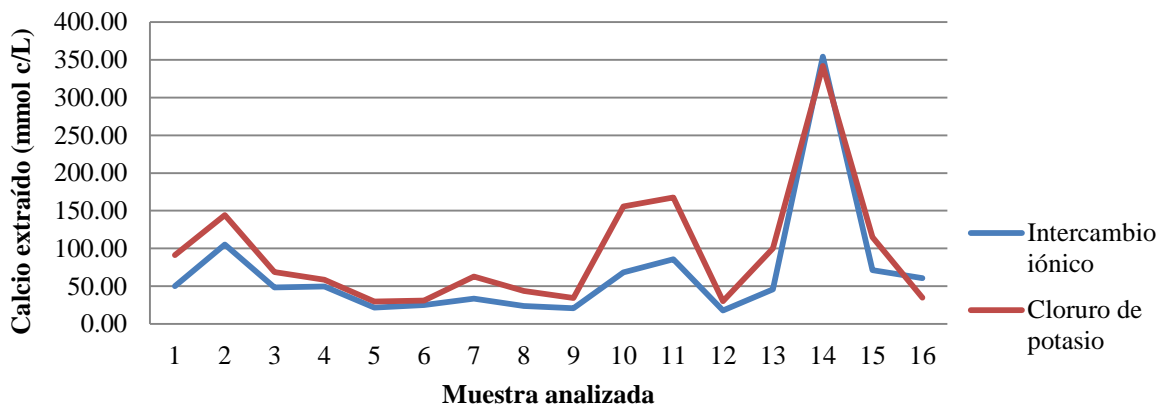
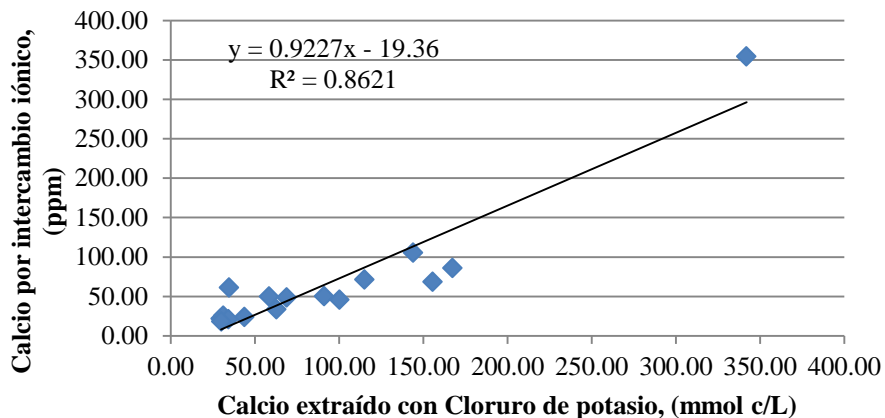


Figura 80. Extracción de calcio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región IV



5. Región V

Figura 81. Extracción de calcio en suelos de Región V por diferentes métodos

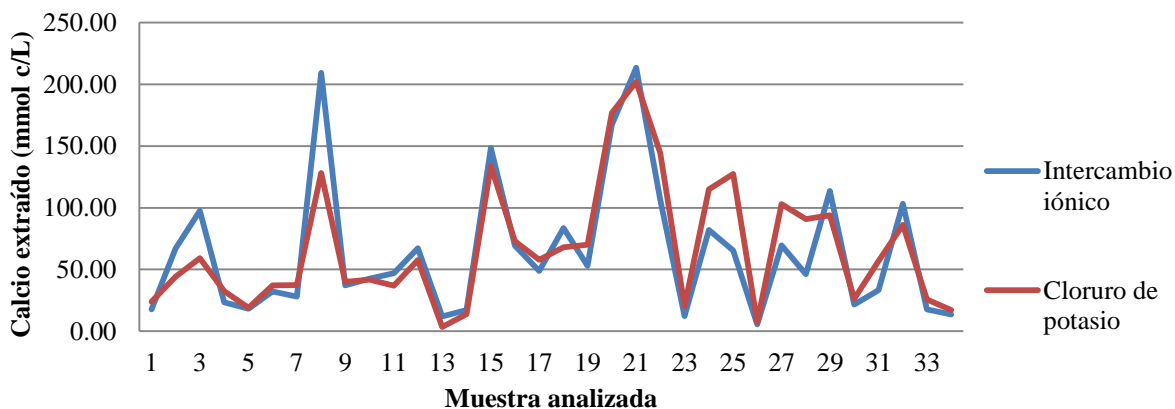
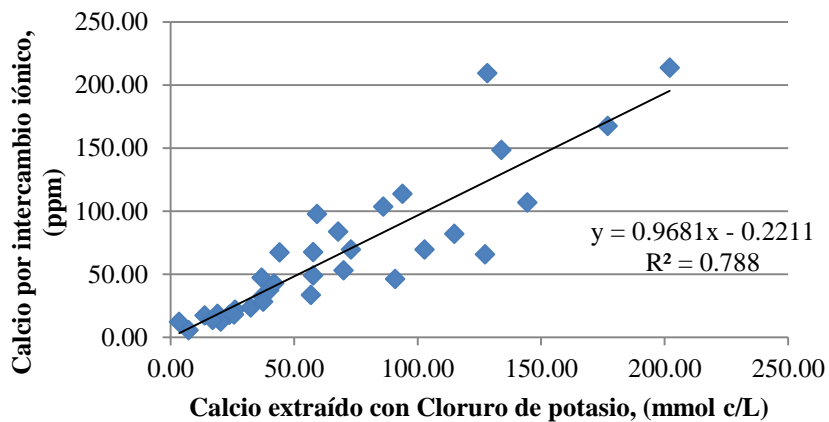


Figura 82. Extracción de calcio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región V



6. Región VI

Figura 83. Extracción de calcio en suelos de Región VI por diferentes métodos

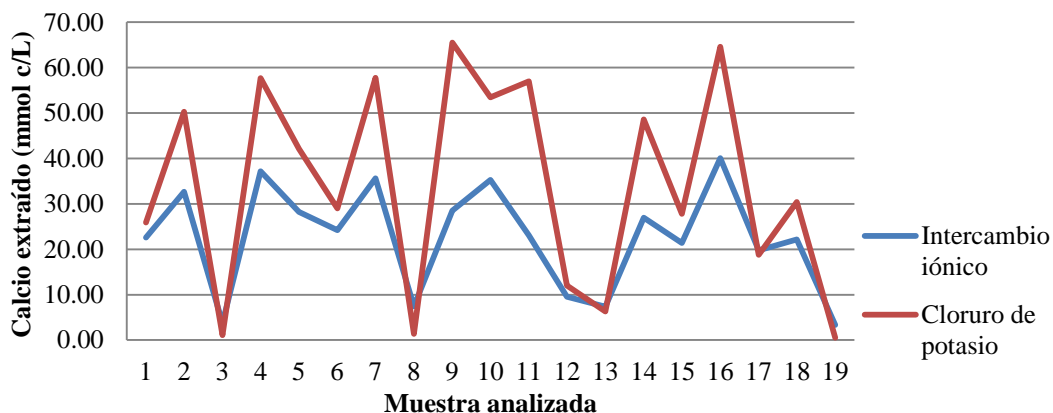
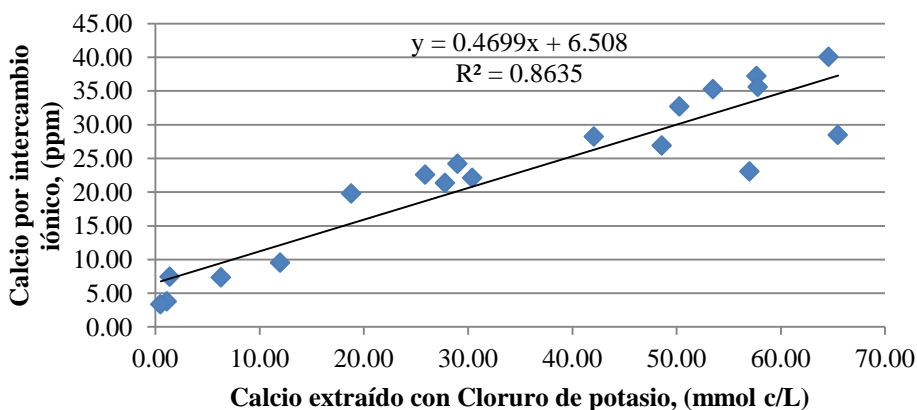


Figura 84. Extracción de calcio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región VI



7. Región VI

Figura 85. Extracción de calcio en suelos de Región VII por diferentes métodos

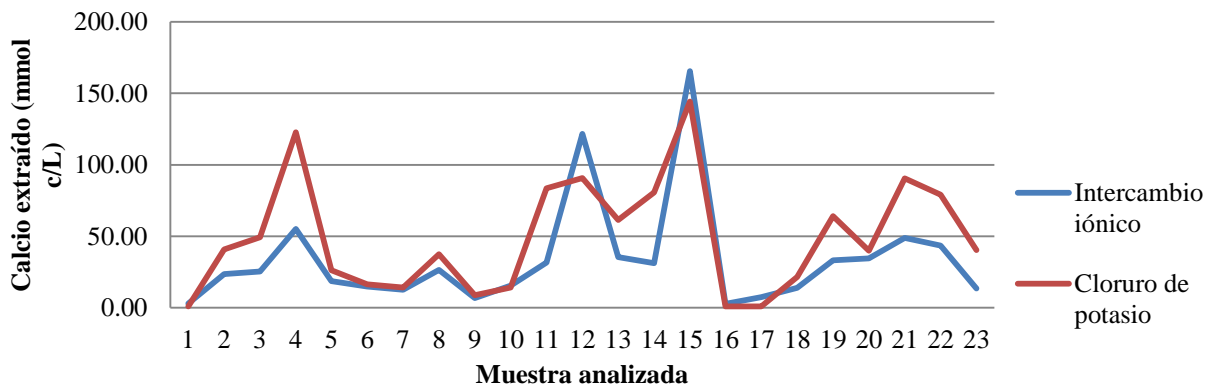
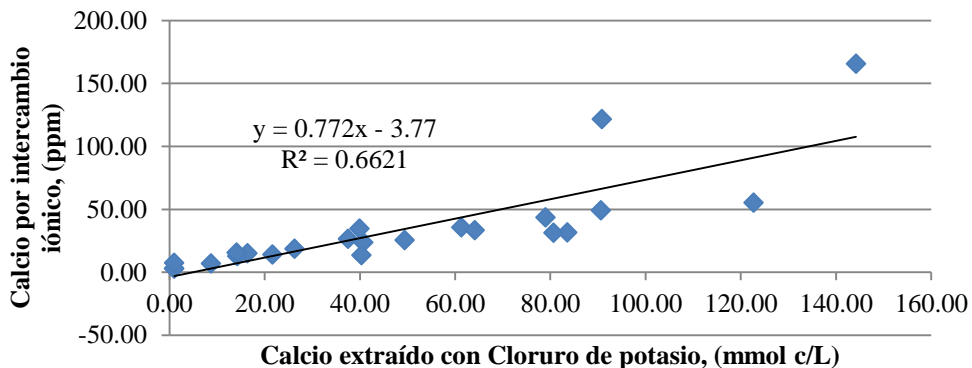


Figura 86. Extracción de calcio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región VII



M. Gráficas de extracción de magnesio

1. Región I

Figura 87. Extracción de magnesio en suelos de Región I por diferentes métodos

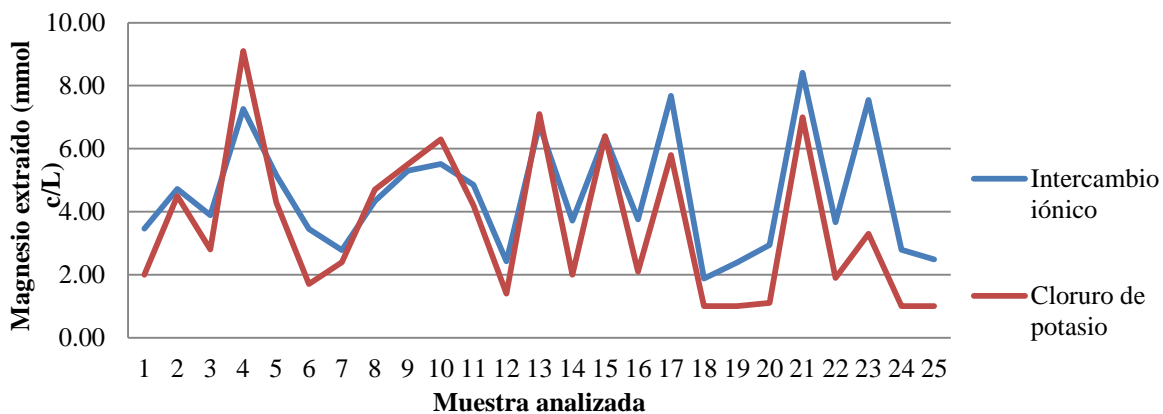
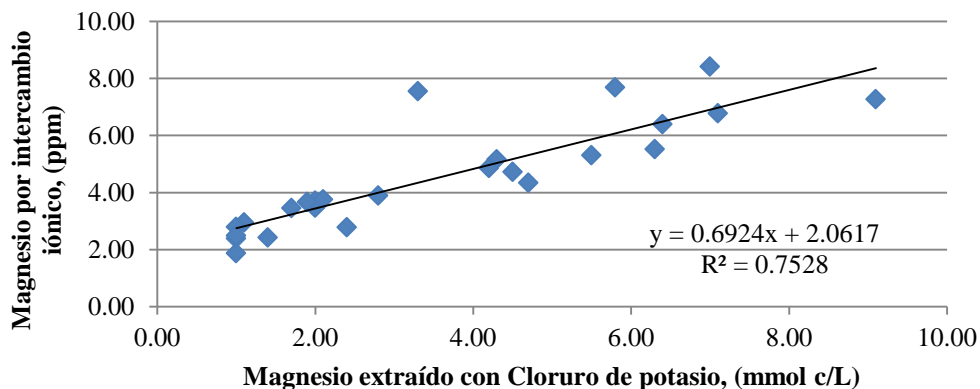


Figura 88. Extracción de magnesio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región I



2. Región II

Figura 89. Extracción de magnesio en suelos de Región II por diferentes métodos

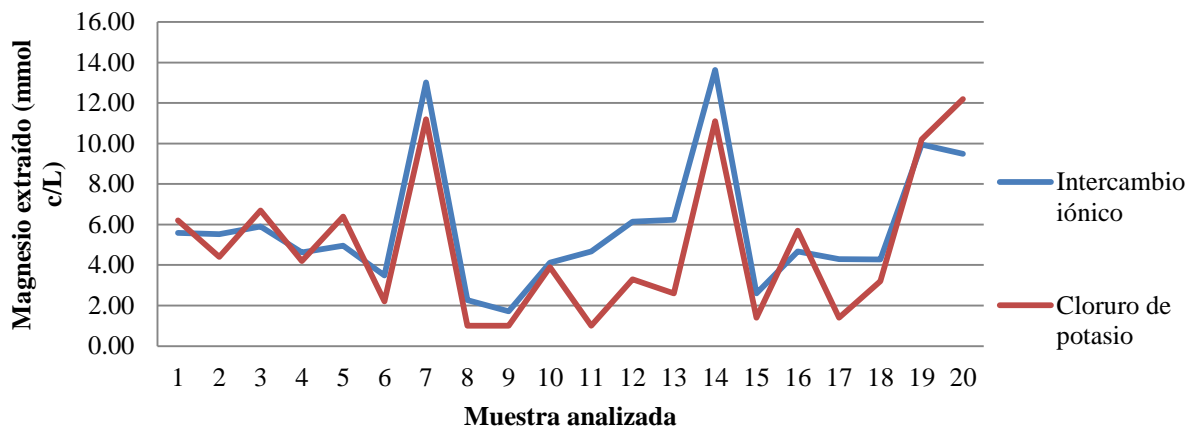
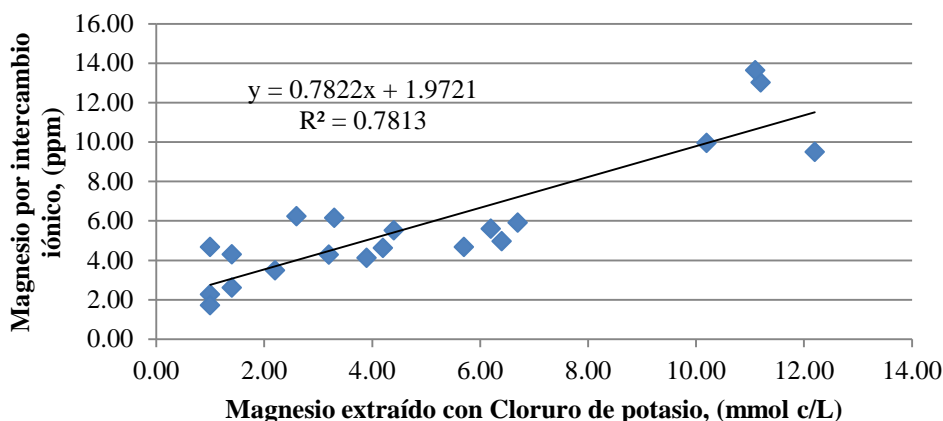


Figura 90. Extracción de magnesio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región II



3. Región III

Figura 91. Extracción de magnesio en suelos de Región III por diferentes métodos

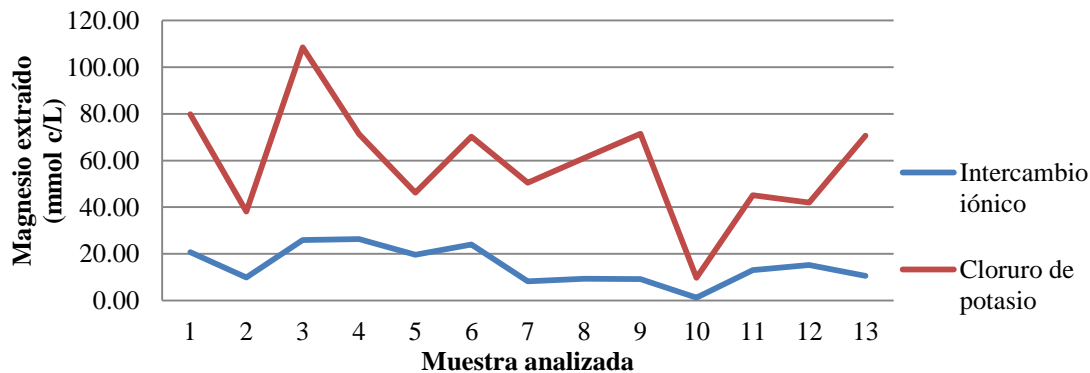
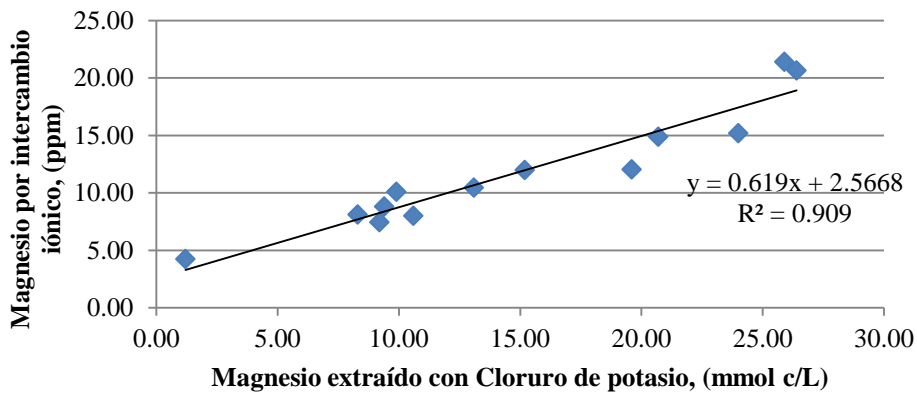


Figura 92. Extracción de magnesio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región III



4. Región IV

Figura 93. Extracción de magnesio en suelos de Región IV por diferentes métodos

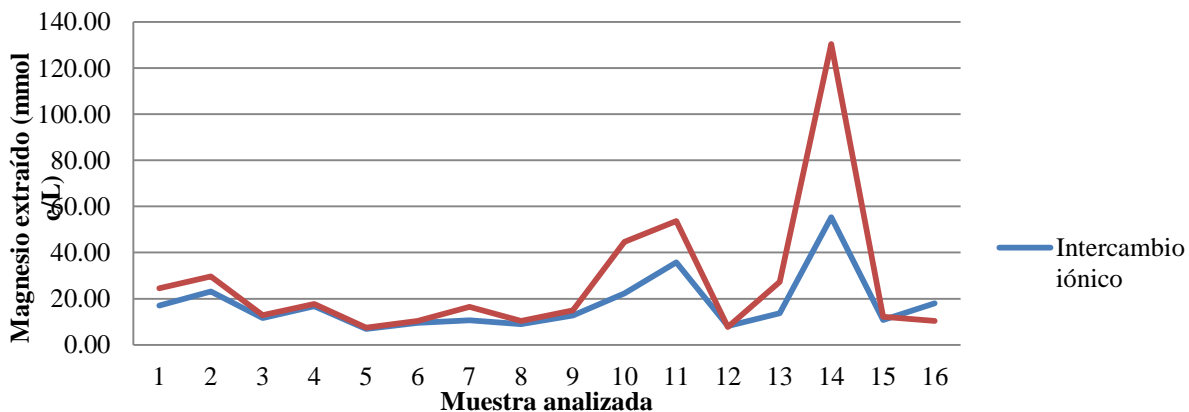
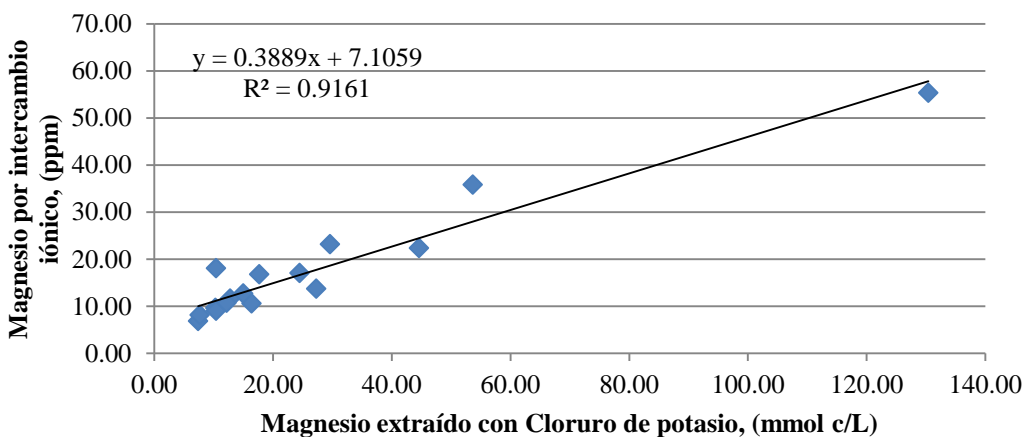


Figura 94. Extracción de magnesio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región IV



5. Región V

Figura 95. Extracción de magnesio en suelos de Región V por diferentes métodos

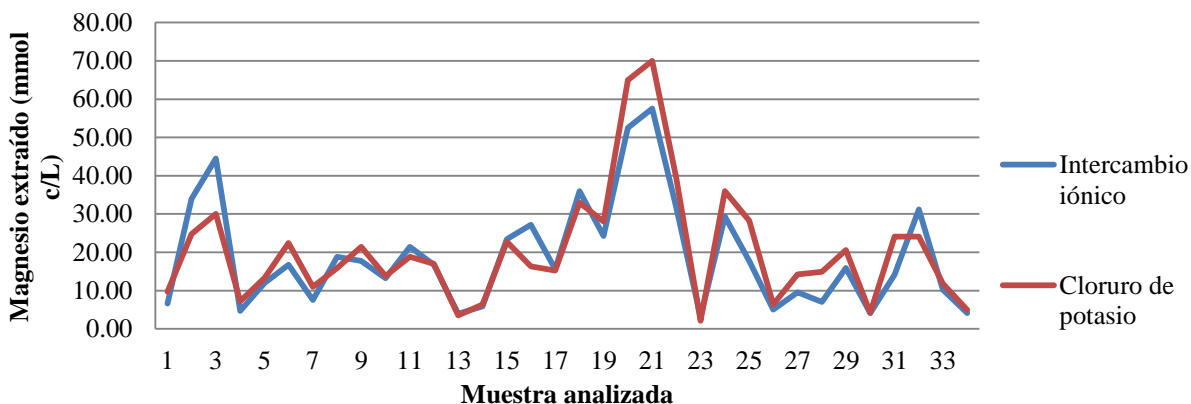
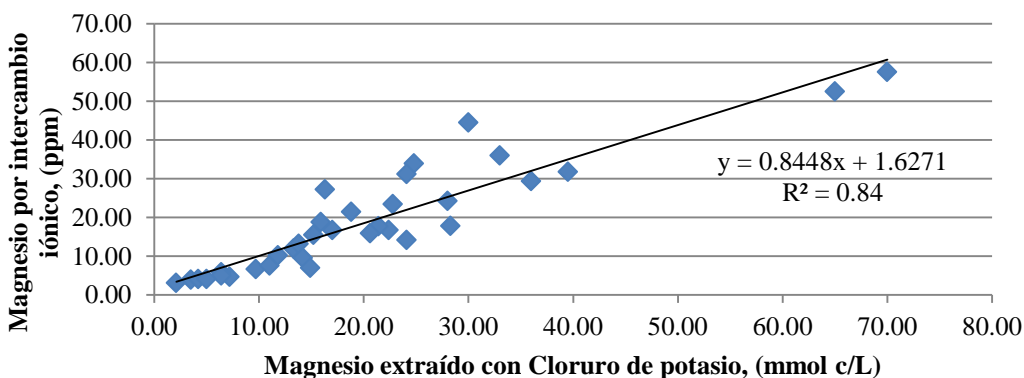


Figura 96. Extracción de magnesio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región V



6. Región VI

Figura 97. Extracción de magnesio en suelos de Región VI por diferentes métodos

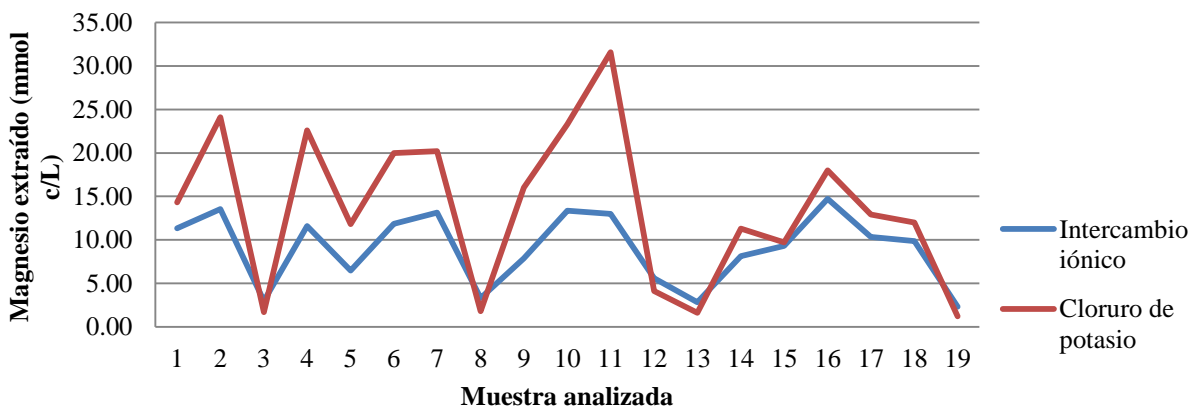
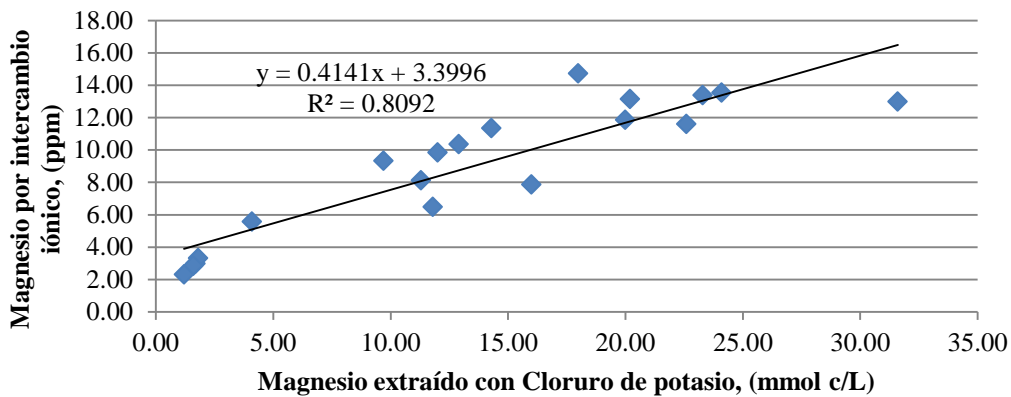


Figura 98. Extracción de magnesio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región VI



7. Región VII

Figura 99. Extracción de magnesio en suelos de Región VII por diferentes métodos

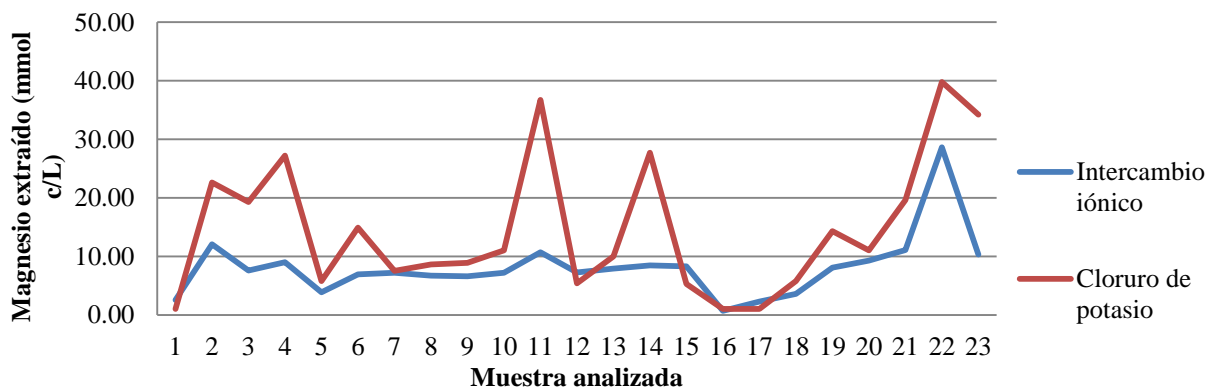
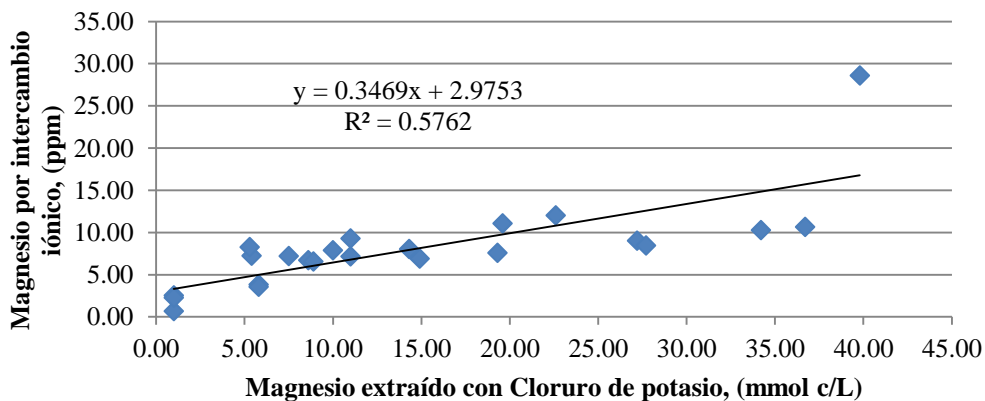


Figura 100. Extracción de magnesio por intercambio iónico Vs. Cloruro de potasio en Región VII



N. Pruebas de la ecuación de Freundlich

Figura 101. Log q_e versus Log C_e según Ley de Freundlich para curva de adsorción de fósforo

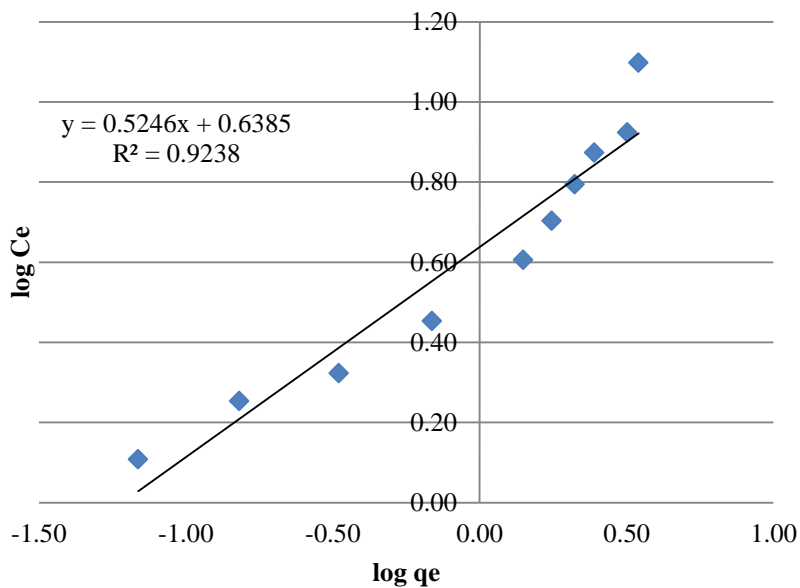


Figura 102. Log q_e versus Log C_e según Ley de Freundlich para curva de adsorción de potasio

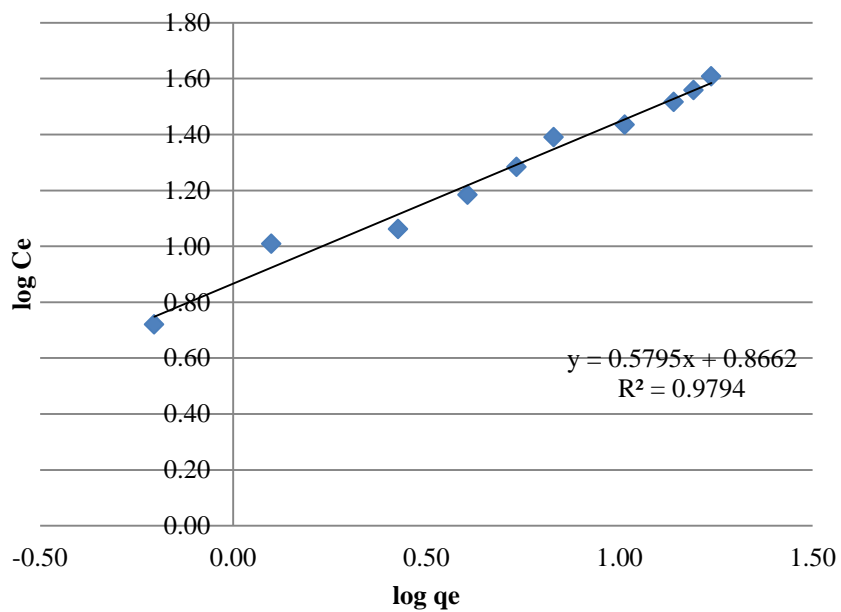
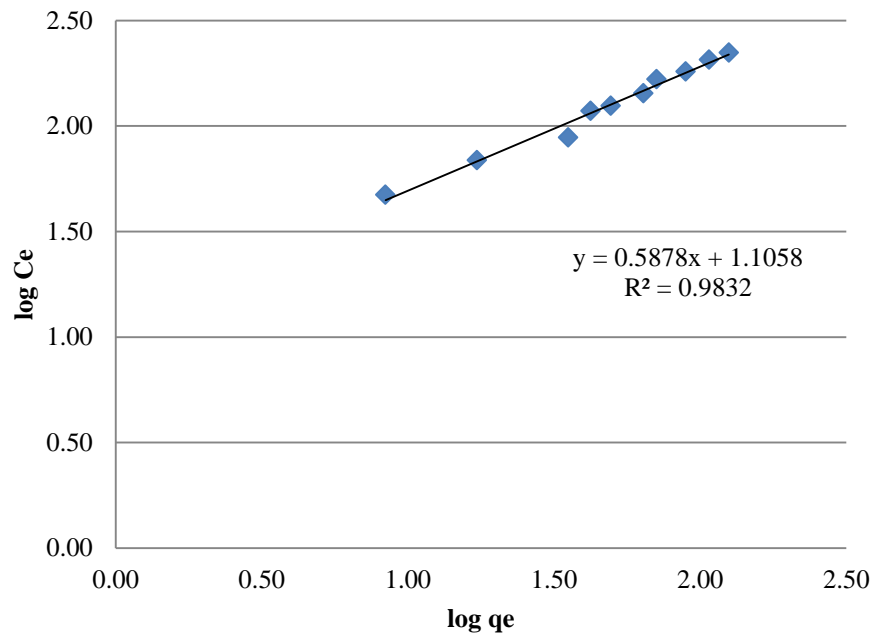
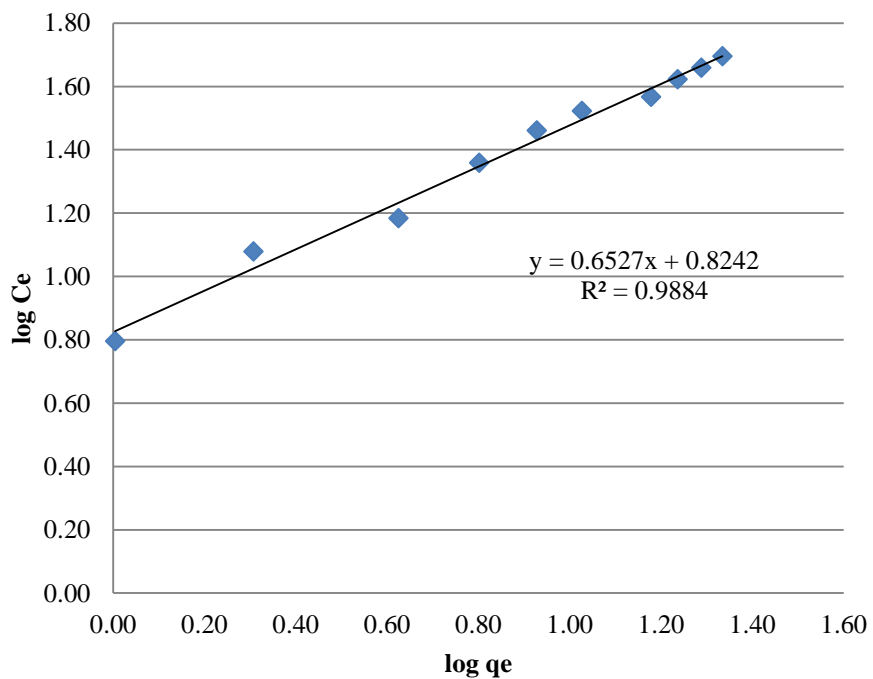


Figura 103. Log q_e versus Log C_e según Ley de Freundlich para curva de adsorción de calcio**Figura 104.** Log q_e versus Log C_e según Ley de Freundlich para curva de adsorción de magnesio

O. Curvas de equilibrio de adsorción

Figura 105. Curva de equilibrio de la adsorción de P sobre las resinas intercambiadoras de iones.

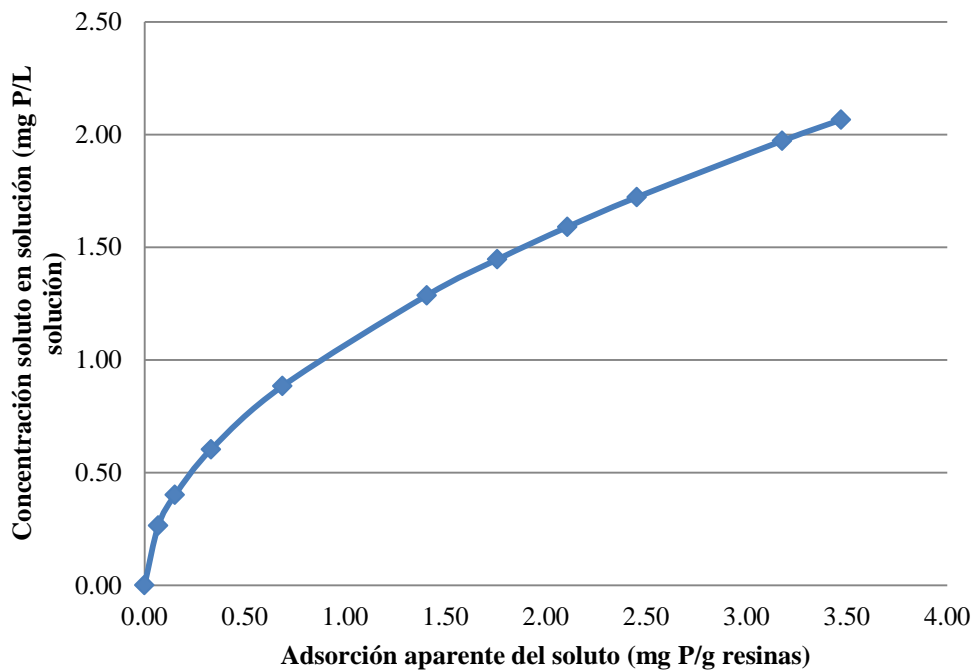


Figura 106. Curva de equilibrio de la adsorción de K sobre las resinas intercambiadoras de iones.

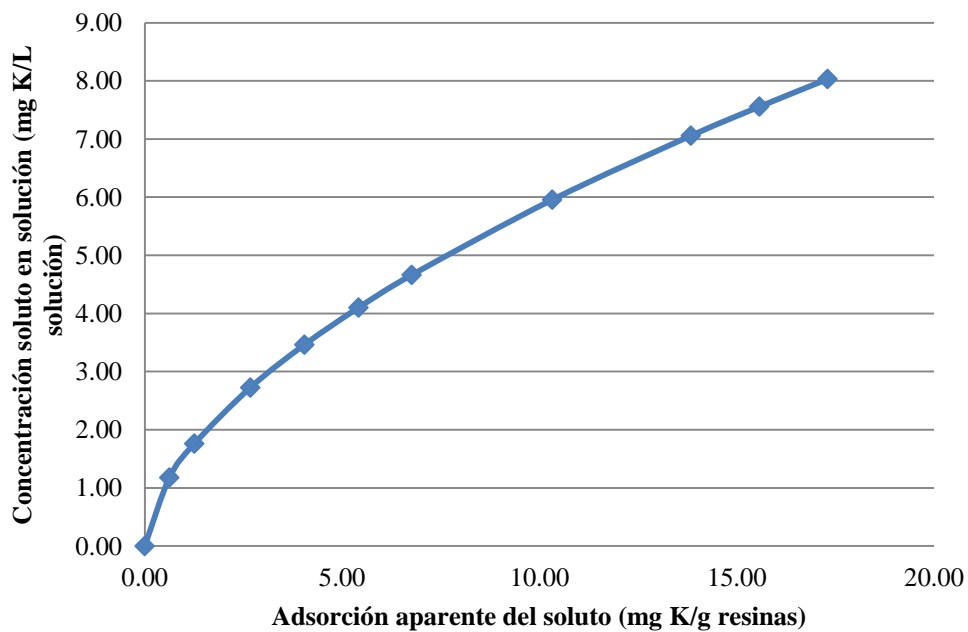


Figura 107. Curva de equilibrio de la adsorción de Ca sobre las resinas intercambiadoras de iones.

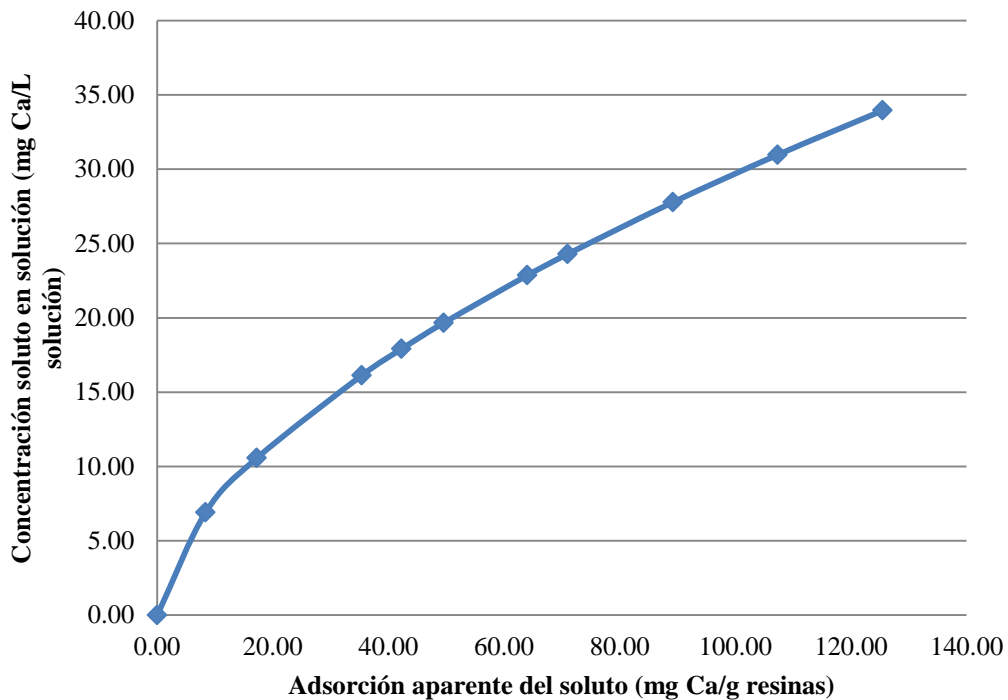


Figura 108. Curva de equilibrio de la adsorción de Mg sobre las resinas intercambiadoras de iones.

