

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DE ORIENTE
LICENCIATURA EN AGRONOMIA**

**CORRELACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE SUELOS
DE DOBLE ÁCIDO DILUIDO Y EL PROCEDIMIENTO SIMPLIFICADO “BYU”,
PARA LA DETERMINACIÓN DE FÓSFORO Y POTASIO, EN SUELOS DE
GUATEMALA, 2004.**

TESIS

Presentada al Honorable Consejo Regional

Por

GADID MARIANO ARMANDO ARTEAGA MATÍAS

En el acto de Investidura como

Licenciado en Agronomía

CHIQUMULA, GUATEMALA, ENERO DE 2006.

ÍNDICE

CONTENIDO	Página
I. INTRODUCCIÓN	01
II. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	03
III. JUSTIFICACIÓN	04
IV. OBJETIVOS	05
V. HIPOTESIS	06
VI. MARCO TEÓRICO	07
6.1 Marco conceptual	07
6.1.1 Fósforo en el suelo	07
6.1.2 Potasio en el suelo	08
6.1.3 Evaluación de la fertilidad de los suelos	10
6.1.4 Análisis de los suelos	11
6.1.5 Metodologías de análisis de suelos usadas en Guatemala	19
6.1.6 Expresión de los resultados de análisis de suelos	24
6.1.7 Correlación de metodologías de análisis de suelos	25
6.2 Marco referencial	
6.2.1 Procedencia de las muestras de suelos a analizar	26
6.2.2 Investigaciones realizadas sobre metodologías de análisis de suelos	27
VII. METODOLOGÍA	
7.1 Determinación de índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio	29
7.1.1 Metodología de Doble Ácido Diluido	29
7.1.2 Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young	30
7.2 Correlación de las metodologías de análisis de suelos	34
7.3 Comparación de los tiempos, procesos y costos variables	

de las metodologías para determinar Fósforo y Potasio	35
VIII. RESULTADOS	
8.1 Determinación de índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio	36
8.1.1 Índices de disponibilidad de Fósforo	36
8.1.2 Índices de disponibilidad de Potasio	37
8.2 Análisis de correlación de las metodologías del Doble Ácido Diluido y el Procedimiento simplificado BYU	37
8.2.1 Análisis de correlación para Fósforo	37
8.2.2 Análisis de correlación para Potasio	39
8.3 Comparación de tiempos, procesos y costos variables de las metodologías para determinar Fósforo y Potasio	42
8.3.1 Comparación de tiempos y procesos de las metodologías para determinar Fósforo y Potasio	42
8.3.2 Comparación de costos variables de las metodologías para determinar Fósforo y Potasio	44
IX. CONCLUSIONES	47
X. RECOMENDACIONES	48
XI. BIBLIOGRAFÍA	49
XII. ANEXOS	51

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO No.	Página
1. Lugares de muestreo y número de muestras	26
2. Regla de decisión del Coeficiente de Correlación	34
3. Correlaciones para Fósforo entre las metodologías de análisis de suelos de Doble Ácido Diluido y el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young	38
4. Correlaciones para Potasio entre las metodologías de análisis de suelos de Doble Ácido Diluido y el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young	40
5. Cuadro resumen del diagrama de flujo de proceso para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo con la metodología de Doble Ácido Diluido	42
6. Cuadro resumen del diagrama de flujo de proceso para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo con el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young	43
7. Cuadro resumen del diagrama de flujo de proceso para la determinación de los índices de disponibilidad de Potasio con la metodología de Doble Ácido Diluido	43
8. Cuadro resumen del diagrama de flujo de proceso para la determinación de los índices de disponibilidad de Potasio con el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young	44
9. Costo variable para la determinar Fósforo y Potasio en 1 muestra de suelo con la metodología de Doble Ácido Diluido	45
10. Costo variable para la determinar Fósforo y Potasio en 1 muestra de suelo con el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young	45

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA No.	Página
1. Espectrofotómetro (Spectronic 20)	20
2. Espectrofotómetro de Absorción Atómica	21
3. Percoladora de café expreso usada para obtener el extracto del suelo	23
4. Índices de disponibilidad de Fósforo obtenidos con el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young y la metodología de Doble Ácido Diluido	36
5. Índices de disponibilidad de Potasio obtenidos con el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young y la metodología de Doble Ácido Diluido	37
6. Índices de disponibilidad de Fósforo de 0-10 ppm (Bajo)	39
7. Índices de disponibilidad de Fósforo de 10-15 ppm (Medio)	39
8. Índices de disponibilidad de Fósforo de 15-30 ppm (Alto)	39
9. Índices de disponibilidad de Fósforo > 30 ppm (Muy alto)	39
10. Índices de disponibilidad de Potasio de 0.1-0.3 meq/100 gr de suelo (Bajo)	41
11. Índices de disponibilidad de Potasio de 0.3-0.4 meq/100 gr de suelo (Medio)	41
12. Índices de disponibilidad de Potasio de 0.4-1.1 meq/100 gr de suelo (Alto)	41
13. Índices de disponibilidad de Potasio > 1.1 meq/100 gr de suelo (Muy alto)	41

I. INTRODUCCIÓN

El análisis de suelos es una herramienta útil para la agricultura, al permitir que la producción agrícola sea más efectiva, mediante la fertilización basada en la disponibilidad aparente del suelo y la necesidad de la planta, para proveerle nutrimentos. Esto lógicamente se ve reflejado en un aumento de la rentabilidad y una disminución del impacto ambiental que conlleva el uso de fertilizantes.

Se han desarrollado en las últimas décadas, diferentes métodos para la extracción del fósforo disponible en los suelos, en la búsqueda por un método con el cual se pueda pronosticar la posible respuesta de la planta bajo una extensa variedad de condiciones de suelo, y que además sea conveniente para usarse en pruebas de rutina de suelo. Dicha búsqueda hasta aquí no ha sido exitosa.

La Universidad de Brigham Young de E.E.U.U. ha desarrollado un procedimiento de análisis de suelos para ser usado en países en vías de desarrollo. Los autores consideran que este procedimiento además de ser simple es eficiente e implica menos costos que la metodología de Doble Ácido Diluido, la cual es usada en el laboratorio de análisis de suelos del Centro Universitario de Oriente y otros laboratorios del país.

Este procedimiento propone la extracción de los elementos nitrógeno (Nitrato-nitrógeno), fósforo (P) y potasio (K) de la muestra de suelo a través de agua caliente presurizada, utilizando una percoladora de café expreso. Los índices de disponibilidad de los nutrientes son cuantificados con técnicas colorimétricas utilizando el espectrofotómetro (Spectronic 20).

La Universidad de Brigham Young, pretende implementar en Guatemala el procedimiento simplificado de análisis de suelos, pero previo a su implementación y adopción es necesario determinar que tanto se correlacionan los resultados obtenidos con el procedimiento simplificado comparados con los obtenidos con la

metodología de Doble Ácido Diluido, la cual ya ha sido evaluada, y así, poder inferir que tan aceptable es la nueva alternativa, no solo en precisión sino también en cuanto al tiempo necesario para los análisis.

En la presente investigación se determinaron los índices de disponibilidad de fósforo y potasio de 115 muestras de suelos del país haciendo uso de las dos metodologías de análisis de suelos. Luego se realizó el análisis de correlación correspondiente a los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio, para determinar el grado de asociación existente entre las dos metodologías. Además se hicieron diagramas de flujo para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio de ambas metodologías con el objeto de comparar el tiempo invertido y establecer cual es más rápida y requiere menos operaciones. Por último, se estimó los costos variables para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio de cada metodología con la finalidad de demostrar cuál tiene menor costo.

La investigación se llevó a cabo en el laboratorio de suelos del Centro Universitario de Oriente, ubicado en la Finca el Zapotillo, ciudad de Chiquimula, departamento de Chiquimula y simultáneamente en la Universidad de Brigham Young de E.E.U.U.

II. DEFINICION DEL PROBLEMA

En los laboratorios de análisis de suelos de Guatemala, especialmente el del Centro Universitario de Oriente, lo más común es usar la metodología de Doble Ácido Diluido para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio. La Universidad de Brigham Young en la búsqueda de una nueva alternativa de análisis de suelos que permita determinar éstos índices de disponibilidad, ha desarrollado un procedimiento simplificado el cual sustenta ser más rápido, más barato y muy similar en resultados en relación a la Metodología de Doble Ácido. Sin embargo, es necesario demostrar si los valores extraídos son o no similares a los valores extraídos con la metodología de Doble Ácido Diluido, la cual ya ha sido evaluada junto con otras metodologías convencionales de análisis de suelos en algunos suelos del país.

III. JUSTIFICACIÓN

El laboratorio de análisis de suelos del Centro Universitario de Oriente al igual que otros laboratorios de análisis de suelos de Guatemala utiliza la metodología de Doble Ácido Diluido para realizar dichos análisis.

Las mejores pruebas de disponibilidad de nutrimentos en los suelos son aquellas que reflejan una relación estrecha entre la cantidad de nutriente en el suelo y los rendimientos de los cultivos y son, además, insensibles a las propiedades del suelo.

Hasta el momento se pueden considerar como los mejores métodos de extracción para Fósforo el del agua y el del anión resina intercambiable, al simular estrechamente la tendencia actual del Fósforo en la solución del suelo, estos métodos no son muy usados en pruebas de rutina del suelo porque dificultan el análisis. Además en el caso del método del agua la cantidad extraída de Fósforo es también baja, especialmente en suelos tropicales con alta capacidad de sorción de Fósforo. El procedimiento simplificado BYU al hacer la extracción de los elementos Nitrógeno (Nitrato-nitrógeno), Fósforo (P) y Potasio (K) del suelo a través de agua caliente presurizada, pretende superar dichas limitaciones, y las de Doble Ácido Diluido, por lo consiguiente es necesario conocer el grado de similitud del procedimiento BYU comparado con la metodología de Doble Ácido Diluido.

IV. OBJETIVOS

4.1 GENERAL

Generar información que contribuya a validar una nueva metodología de análisis de suelos para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio en suelos de Guatemala.

4.2 ESPECÍFICOS

- 4.2.1 Determinar los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio en suelos de Guatemala utilizando las metodologías de análisis de suelos de Doble Ácido Diluido y la simplificada de la Universidad de Brigham Young.
- 4.2.2 Determinar el grado de correlación entre las dos metodologías de análisis de suelos.
- 4.2.3 Realizar una comparación de los tiempos, procesos y costos variables invertidos en la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio de las metodologías de análisis de suelos.

V. HIPÓTESIS

La metodología de Doble Ácido Diluido y el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young, presentan un alto grado de correlación entre los valores de los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio en los diferentes suelos del país.

VI. MARCO TEÓRICO

6.1 MARCO CONCEPTUAL

6.1.1 FÓSFORO EN EL SUELO

El Fósforo (P) en el suelo se encuentra formando parte de agrupaciones orgánicas e inorgánicas. Dependiendo del tipo de suelo, se puede decir que entre 60-50% corresponde a la fracción orgánica, mientras que el resto se encuentra en forma inorgánica. Las formas orgánicas se hallan en el humus del suelo, en diferentes niveles de estabilización. Dentro de la compleja configuración del humus, podemos distinguir sustancias orgánicas más accesibles para las plantas (lábil) y otras de menor accesibilidad (no lábil) (5).

El motor que mueve todas las formas orgánicas y que realizan la mineralización del P orgánico, es la actividad microbiana (5).

El P inorgánico está representado por diferentes fracciones o pooles (5):

- P presente en los minerales primarios (básicamente apatitas).
- P adsorbido (lábil) en las arcillas.
- P en solución: es el que pueden aprovechar las plantas: HPO_4^- y H_2PO_4^- .
- P no lábil (poco disponible) representado por P precipitado/Ocluido.

A medida que el P disponible en la solución del suelo es absorbido por las plantas, es repuesto a partir de la mineralización del humus, de las fracciones más lábil de las arcillas y en forma mucho más lenta, desde la mineralogía primaria. Este reaprovisionamiento de P hacia la solución del suelo, se realiza mediante un equilibrio químico dinámico (5).

Las plantas absorben la mayoría del fósforo como el ión ortofosfato primario (H_2PO_4^-). Aunque también absorben pequeñas cantidades de fósforo

como ión ortofosfato secundario (H_2PO_4^-). El pH del suelo influye en gran parte en la absorción de estas dos formas de fósforo por la planta (8).

El fósforo soluble en el suelo, sin importar que éste provenga de la apatita, fertilizante, estiércol o materia orgánica, forma compuestos con el calcio, hierro, aluminio y manganeso o se enlaza con la superficie reactiva de ciertos minerales arcillosos como la caolinita, los óxidos de aluminio y hierro en suelos tropicales rojos y la alófana, imogolita y complejos de humus-aluminio en los suelos derivados de ceniza volcánica. Estas reacciones reducen la disponibilidad de fósforo para las plantas. Sin embargo, compuestos como el fosfato dicálcico y el fosfato octacálcico son relativamente disponibles para las plantas (8).

El fósforo se mueve muy poco en la mayoría de los suelos. Generalmente se mantiene en el lugar donde ha sido colocado por la meteorización de los minerales o por la fertilización. Casi todo el fósforo se mueve en el suelo por difusión, proceso lento y de poco alcance que depende de la humedad del suelo (8).

Existe una dependencia muy estrecha entre el pH del suelo y la presencia de formas asimilables y formas bloqueadas de fósforo para nutrición vegetal. En los suelos de pH ácido el fósforo asimilable suele presentarse en forma de fosfatos de hierro y aluminio; en los con pH neutro, en cambio, procede de fosfatos de calcio solubles; pero con un pH superior a 7.5 aumentan las formas insolubles del fósforo, que no son asimilables por las plantas. Por todo ello, es imprescindible conocer previamente el pH del suelo y, en función de éste, elegir el procedimiento más adecuado (4).

6.1.2 POTASIO EN EL SUELO

El contenido de K en la litosfera es del orden del 1.58%, pero existen variaciones según la clase de rocas presentes. En los suelos, el contenido

de K está estrechamente relacionado con el tipo de material parental y la pedogénesis (Mengel y Rahmatullah, 1994) (2).

Varias investigaciones confirmaron que el sistema agrícola no tiene otra vía de ingreso natural para el balance de K que la reposición primaria proveniente de la liberación de los minerales primarios y secundarios, siendo preponderante la participación de la fracción arcilla. Los minerales arcillosos son la fuente principal de K en el suelo (Sardi y Debreczeni, 1992; Buhman, 1993) (2).

Los análisis químicos muestran que el contenido de K total del suelo no es un índice de fertilidad para los cultivos y que los suelos contienen K en diferentes formas. Una parte extraíble por reactivos muy suaves, tales como el agua o soluciones salinas diluidas; otra parte puede extraerse solamente con reactivos fuertes tales como ácido nítrico hirviente. Numerosas investigaciones demostraron que estas formas extremas difieren en la facilidad con las que las plantas pueden extraerlas (2).

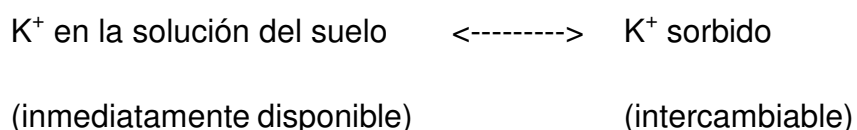
El potasio es absorbido del suelo por las plantas en forma iónica (K^+). A diferencia del nitrógeno y el fósforo, el potasio no forma compuestos orgánicos en la planta (8).

El potasio está presente en el suelo en tres formas: en solución, intercambiable y no intercambiable (4).

El K de la solución de suelo está inmediatamente disponible y puede ser absorbido por las plantas en forma inmediata, pero las cantidades presentes son muy pequeñas, apenas una mínima porción del K total del suelo se encuentra en esta forma. Las plantas en crecimiento rápidamente extraen el K de la solución del suelo, pero a medida que el K es absorbido y extraído, su concentración es renovada y restituida inmediatamente por la cesión de formas menos fácilmente accesibles ubicadas en las zonas de

adsorción de los coloides minerales y orgánicos del suelo. El proceso de adsorción-desorción es el que repone y equilibra la concentración de K de la solución del suelo (2).

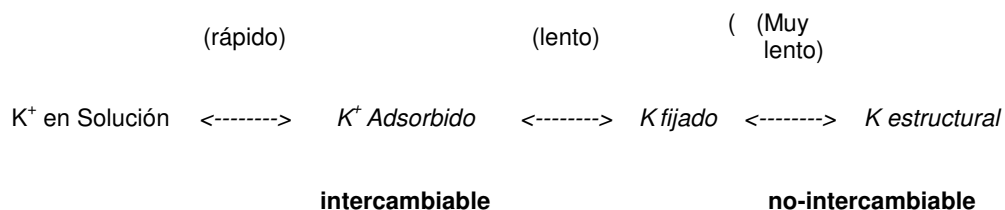
El Potasio intercambiable, es la forma iónica del potasio (K^+) unido electrostáticamente a los materiales que componen la fase sólida coloidal mineral y orgánica. A medida que la concentración del K de la solución desciende, el K adsorbido es liberado a la solución del suelo. A la inversa, si la concentración de K de la solución del suelo aumenta por la aplicación de fertilizantes potásicos, parte de éste dejará la solución y se unirá electrostáticamente al material coloidal de la fase sólida. El proceso de equilibrio es instantáneo (2):



El K de la solución más el intercambiable, es comúnmente denominado K "disponible" y medido en los análisis convencionales para evaluar la fertilidad del suelo (2).

Existen formas de K que están fuertemente unidas a la fase sólida mineral, las cuales se denominan: "K fijado" y "K estructural". Ambas constituyen el K de reserva o de reposición de los suelos. El K fijado es el que se ubica en el espacio hexagonal de las láminas de silicio y el K estructural que es el que está químicamente combinado con los elementos en la estructura de los minerales del suelo. Ambas formas son denominadas no-intercambiables (2).

Se produce un equilibrio entre el K intercambiable y estas formas no-intercambiables. El proceso para alcanzar el estado de equilibrio es mucho más lento que el de K de la solución del suelo-K intercambiable (2).



6.1.3 EVALUACIÓN DE LA FERTILIDAD DE LOS SUELOS

Esta evaluación es el proceso mediante el cual se diagnostican los problemas de disponibilidad de nutrimentos y se recomiendan programas de fertilización al suelo y foliares, con los cuales es posible alcanzar los objetivos de la nutrición vegetal (6).

Existen varios procedimientos para hacer la evaluación mencionada y entre ellos el más difundido es el análisis de suelo y el análisis de tejido foliar; seguidos por pruebas de invernadero con la técnica del elemento faltante, ensayos de fertilizantes simples y combinaciones de ellos (6).

Cualquiera de los procesos citados que se utilice, será exacto en su predicción o diagnóstico, en función de la exactitud con que se recolecte la muestra de suelo y/o foliar, para someterla al respectivo análisis (6).

6.1.4 ANÁLISIS DE SUELOS

El análisis de suelos, constituye unas de las técnicas más utilizadas para la recomendación de fertilizantes. Mediante el análisis de muestras representativas de suelos en las que se determina la concentración total de uno o más elementos, o la concentración de nutrimentos solubles o asimilables (10).

En los análisis se utilizan ácidos débiles y otras sustancias como soluciones extractoras, las cuales no remueven necesariamente la misma cantidad de nutrimentos que un cultivo dado. Extraen cierta fracción que puede o no estar correlacionada con la respuesta de la planta a la aplicación de

fertilizantes. Cuando esta correlación se ha realizado en un cultivo dado, en condiciones de suelo establecidas, los análisis de suelos son de gran utilidad, de lo contrario solo tienen un valor relativo (10).

De acuerdo a la solución extractora usada entre los métodos de análisis de suelos tenemos los siguientes:

❖ **Métodos para determinar los índices de disponibilidad de potasio.**

La selección del método para la determinación de los índices de disponibilidad de potasio debe estar basada en la naturaleza de los suelos a ser examinados y la instrumentación disponible (1).

Método de acetato de amonio 1.0N neutro (NH_4Ac)

Puesto que la cantidad de potasio intercambiable del suelo depende de la naturaleza de la solución para reemplazarlo, el potasio intercambiable es definido más específicamente como aquel el cual es extraído con Acetato de Amonio 1.N neutro menos el potasio soluble en agua (1).

Para la extracción se utilizan 10 gramos de suelo preparado para el análisis (5 gramos si el suelo contiene más de 500 ppm de potasio extractable) y 25 centímetros cúbicos de solución de Acetato de Amonio (15).

El uso de este método es necesario en suelos calcáreos con alta capacidad de intercambio. Este método requiere más capacidad de reemplazo que la permitida por el método del ácido débil (1).

Hay que tener en cuenta que, debido a la afinidad entre el K^+ y el NH_4^+ , solamente se desplaza el K^+ de las posiciones de fácil intercambio (14).

Método del ácido sulfúrico frío

Este método ha sido usado para determinar la disponibilidad de potasio en suelos ácidos y neutros. En general, el uso de este método es aceptable en muchos suelos que tienen un CEC < 10 meq/100 g y que son relativamente bajos en materia orgánica (< 5%) (1).

Método del potasio soluble en agua

En suelos no salinos la cantidad de potasio soluble es tan pequeña que no es apreciable el error hecho al incluirlo junto con el potasio intercambiable. Sin embargo, en suelos salinos el potasio soluble debe ser determinado por un extracto saturado o un extracto similar y restado del potasio encontrado con Acetato de Amonio. La eliminación del potasio soluble en agua del extraído antes con Acetato de Amonio no es recomendable, porque cuando el contenido de sal de la solución del suelo decrece, la adsorción de cationes divalentes en solución aumenta (1).

❖ Métodos para determinar los índices de disponibilidad de fósforo

Los métodos para la determinación de fósforo en el suelo, sus varias formas y disponibilidad para las plantas, han sido esenciales para el desarrollo de principios y conocimiento de la naturaleza y conducta del fósforo en los suelos.

Existen muchos métodos, y ellos varían en principio y detalle técnico. La selección del método conveniente demanda una clara afirmación de los objetivos que requiere la medición de fósforo en el suelo. Otras consideraciones incluyen las propiedades del suelo, condición de la muestra o ambiente, exactitud y reproducibilidad, y los medios, equipo y personal disponible (1).

La mayoría métodos de determinación de fósforo en el suelo tienen dos fases distintas-primera, la preparación de la solución de suelo conteniendo el fósforo o fracción de ése, y segunda, la determinación cuantitativa del fósforo en esta solución. La opción del método colorimétrico para la determinación de fósforo depende de la concentración de fósforo en la solución, la concentración de sustancias interfiriendo en la solución a ser analizada, y el sistema ácido particular involucrado en el procedimiento analítico (1).

Los métodos de Molibdeno azul son los más sensibles y, como resultado, son ampliamente usados para extractos de suelos conteniendo pequeñas cantidades de fósforo así como para fósforo total de los suelos. Éstos métodos están basados en el principio que en una solución ácida de Molibdato conteniendo iones Ortofosfato, se forma un complejo de Fosfomolibdato que puede ser reducido por Ácido Ascórbico, Cloruro de Estaño, y otros agentes reductores a un Molibdeno color azul. La intensidad del color azul varía con la concentración de fósforo pero es afectada también por otros factores tales como acidez, arseniatos, silicatos, y otras sustancias las condiciones de oxidación-reducción del sistema. Jackson (1958) ha discutido detalles adicionales de estos métodos. Una amplia variedad de adaptaciones dentro de este principio básico han sido necesarias para aplicar este método general a las condiciones encontradas en la práctica (1).

Método del fósforo soluble en agua

El agua fue probablemente el primer extractante que los investigadores aplicaron para la medición de P en los suelos (12).

El método de Spurway hace la extracción con agua destilada en relación de 1 centímetro cúbico de suelo por 6.5 centímetros cúbicos de

extractante. Fue utilizado durante mucho tiempo en España para la determinación del fósforo fijado pero fácilmente movilizable, denominada como fósforo en reserva. En los casos en que la desorción y solubilización es favorecida (suelos ácidos) o bien dificultada (suelos básicos) la respuesta varía mucho con las previsiones del método (14).

Según Olsen SR; Sommers LE. (1962), la concentración de Fósforo en solución aumenta a medida que aumenta la cantidad de suelo por unidad de volumen de agua. Un extracto a saturación se aproxima más a la concentración de Fósforo que se espera en la solución de donde las raíces absorben el Fósforo; sin embargo, tal extracto requiere más tiempo de preparación y su análisis presenta más dificultades. En algunos casos estos factores pueden no ser tan importantes y los resultados de un extracto a saturación puede ser más deseable.

Como conclusión, Olsen S.R. & Sommers L.E., argumentan que para propósitos de rutina y grandes números de muestras la extracción de Fósforo con agua se utilice una razón de suelo y agua de 1:10.

La concentración de fósforo en solución aumenta a medida que aumenta la cantidad de suelo por unidad de volumen de agua. Para propósitos de rutina y grandes números de muestras, la extracción de fósforo con agua a una razón de 1:10 es más conveniente (1).

Método del fósforo soluble en fluoruro ácido diluido

El extractante usado predominantemente en el cercano oeste de los Estados Unidos es Bray-Kurtz, designado comúnmente Bray No. 1. Este se compone de Ácido Clorhídrico (HCl 0.03N) y Fluoruro de Amonio (NH₄ F 0.025N) (12).

La extracción se hace en la proporción de 1 gramo de suelo por 7 centímetros cúbicos de solución (14).

La extracción del fósforo por este procedimiento se basa sobre el efecto de la solubilidad del H^+ en el fósforo del suelo y la capacidad del F^- de bajar la actividad del Al^{3+} y en un grado inferior del Ca^{2+} y del Fe^{2+} en el sistema de la extracción. El uso de este método se debe limitar normalmente a los suelos con valores de pH menores a 6,8 (pH suelo determinado en agua) cuando la textura de la arcilla es marga o más fina (14).

En general el método propuesto por Bray y Kurtz (1945) ha sido más exitoso en suelos ácidos. Las bajas estimaciones de fósforo disponible en suelos calcáreos han sido atribuidas a la rápida neutralización del ácido por el carbonato de calcio (Blanchard & Calwell, 1964; Randall & Grava, 1971). Algunos suelos ácidos y arenosos pueden mostrar interferencias de fluoruros, el Ácido Bórico elimina la posible interferencia en el desarrollo del color (1).

Método del fósforo soluble en bicarbonato de sodio

Olsen et al. (1954) introdujeron el bicarbonato de sodio de 0,5 M (solución de $NaHCO_3$) en un pH de 8,5 para extraer P de suelos calcáreos, alcalinos, y neutrales.

La extracción se hace en la proporción de 1 gramo de suelo por 20 centímetros cúbicos de solución (14).

Este extractante disminuye el calcio en la solución (a través de la precipitación del carbonato del calcio), y esta disminución realza la disolución de fosfatos de calcio. Por otra parte, esta solución extrae P disuelto y fijado por adsorción en superficies del carbonato y del óxido de hierro del calcio (12).

El extractante de Olsen (NaHCO_3) es absolutamente eficaz para los suelos con CCE alta, alto por ciento de saturación de bases, cantidades medias a altas de fosfatos del calcio, y debe contener carbonatos de calcio (Thomas y Peaslee, 1973). Se utiliza extensivamente en estados tales como Arizona, California, Utah, Wyoming, y Oregon. La investigación también indica que el procedimiento trabaja razonablemente bien en suelos moderadamente ácidos. Sin embargo, no muchos suelos moderadamente ácidos utilizan el procedimiento. El hecho de que no sea utilizado más extensamente en estos suelos es probablemente debido a la carencia de los datos de la correlación (12).

Este método puede proporcionar escasa precisión cuando se aplica en suelos fuertemente calizos, ya que el tiempo de extracción es muy corto (30 minutos) y está comprobado que el “umbral de extracción” no se consigue, para estos suelos hasta pasadas varias horas de aplicación (Coppenet, 1991) (14).

Método del fósforo soluble en ácido clorhídrico diluido y ácido sulfúrico

Mehlich, en 1953 introdujo una combinación de los ácidos HCl y de H_2SO_4 (Mehlich 1) para extraer P de suelos en la región norte-central de los Estados Unidos en esta solución ácida se pueden disolver los fosfatos de hierro y aluminio, y además el P fijado por adsorción en superficies coloidales de los suelos. En la década de los 80s, Mehlich modificó su prueba inicial de suelo y desarrolló un extractante con varios elementos (Mehlich 3) que es conveniente para extraer P y otros elementos en suelos ácidos y neutrales (12).

En los suelos llanos costeros de textura gruesa de Georgia, Gascho et al. (1990) encontraron que Mehlich 3 extrae cerca de 1,46 veces más P que Mehlich 1. Sin embargo, en suelos de textura más fina el extractante de Mehlich 3 extrae cerca de 1,6 veces más P que el

Mehlich 1 (comunicación personal, el Dr. Ray Tucker, Ministerio de Agricultura de Carolina del norte). La capacidad del Mehlich 3 de extraer más P de los suelos es debido a la presencia del ión F^- (como $NH_4 F$), similar a los extractantes de P usados por Bray en el cercano oeste (12).

Método del fósforo soluble en bicarbonato de amonio

Esta Nueva prueba de suelo fue desarrollada para la extracción simultánea de fósforo, nitratos, potasio, cinc, hierro, cobre y manganeso de suelos alcalinos. La solución extracto es Bicarbonato de Amonio 1.0M (NH_4HCO_3) y Ácido Pentaacético Dietilenotriamino 0.005M (DTPA) y tiene un pH de 7.6. Este reactivo extrae sobre el medio tanto fósforo como la prueba $NaHCO_3$. Una pequeña alícuota del extracto es esencial porque grandes cantidades de Amonio pueden hacer turbia la solución (Folsom et al., 1977) (1).

Método del fósforo extractable con Anión Resina

Uno de los métodos más prometedores para estimar la disponibilidad de nutrientes es la tecnología de las resinas de intercambio. Los aniones de resina remueven el fósforo de los suelos sin alteraciones químicas o cambios del pH. Las resinas han sido utilizadas también para evaluar la eficacia de fosfatos residuales, para medir la proporción de fósforo liberado de los suelos y la capacidad buffer de los suelos. La difusión de iones es el principal mecanismo que controla la concentración de nutrientes en la superficie de las raíces, especialmente para los nutrientes inmóviles como fósforo (P) y potasio (K). De igual forma, la acumulación de iones en las resinas de intercambio depende de la concentración y la tasa de la difusión de los iones en el medio circundante. A diferencia del extracto químico de la muestra de suelo, la acumulación de iones en la resina de intercambio depende de la temperatura y el contenido de agua del suelo, factores que afectan tanto la actividad biológica como la difusión de iones. Las resinas de intercambio se entierran en el suelo y de esta forma están expuestas a

las mismas condiciones que las raíces de las plantas, por esta razón, la recuperación de nutrientes de las resinas deberían reflejar mejor la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Una ventaja de las resinas de intercambio sobre los métodos tradicionales de extracción de nutrientes es la relación mecánica entre la recuperación de nutrientes por las resinas de intercambio y la disponibilidad de nutrientes para las plantas (1).

Las resinas de intercambio pueden integrar los efectos de los procesos físicos, químicos y biológicos que afectan la mineralización de nutrientes de las formas orgánicas a inorgánicas, la transformación de unas formas minerales a otras y la difusión de nutrientes a las raíces. Además, las resinas son también útiles para determinar las diferencias en la capacidad de un suelo de suplir nutrientes a medida que éste es afectado por manejo a largo plazo como la rotación de cultivos y la historia de fertilización (1).

6.1.5 METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE SUELOS USADAS EN GUATEMALA

Obviamente hay varias opciones en cuanto a la metodología para suelos de Guatemala. De todos los elementos, talvez la medida de fósforo es la más difícil de estandarizar. La extracción de Mehlich 3 ha tenido mucha aceptación en varias partes del mundo con suelos muy distintos. Países tan distintos como Costa Rica y Canadá están utilizando Mehlich 3 como método estándar. Guatemala, aunque es un país relativamente pequeño, tiene una variación increíble en tipos de suelos (15).

Los resultados se expresan en fósforo elemental (P) o anhídrido fosfórico (P_2O_5). 1 ppm de P_2O_5 equivale a 0.4366 ppm de P (4).

Normalmente las reacciones de potasio en el suelo no son muy complicadas, ni la extracción y evaluación en el laboratorio. Para su determinación se puede usar otros cationes, como Amonio (NH_4^+) o Sodio (Na^+) (15).

Los resultados de los análisis se expresan bien en potasio (K), o bien en potasa (K_2O). 1 ppm K_2O equivale a 0.83 ppm de K (4).

- **Metodología de Doble Ácido Diluido o Carolina del Norte**

Para determinar los índices de disponibilidad de fósforo se hace uso de los siguientes reactivos y equipo, ver figura 1:

Reactivo de Extracción (0.05N HCl en 0.025N H_2SO_4)

Se prepara con 4 mililitros de Ácido Clorhídrico concentrado y 0.7 mililitro de Ácido Sulfúrico concentrado. Estos son puestos en un matraz volumétrico de 1000 mililitros, agregando agua destilada hasta aforar a 1000 mililitros (3).

Reactivo A

Se disuelve 12.0 gramos de Molibdato de Amonio en 250 mililitros de agua destilada. También se disuelve 0.2908 gramos de Tartrato de Antimonio-potasio en 100 mililitros de agua destilada. Se agrega 148 mililitros de H_2SO_4 concentrado en un matraz de 1000 mililitros y se afora con agua destilada. Finalmente se mezcla las tres soluciones en un matraz volumétrico (2000 mililitros) y agrega agua destilada hasta aforar a 2000 mililitros (3).

El reactivo “A”, consiste de Molibdato de Amonio el cual forma un compuesto con los iones de fosfato, que cuando es reducido, forma un color azul. El reactivo “A” también esta constituido por Tartrato de

Antimonio-potasio (Potassium tartrate), este acelera el desarrollo del color y hace que sea estable por más tiempo (7).

RECOMENDACIÓN:

- ❖ No debe estar expuesto a luz directa.

Reactivo B

Se disuelve 0.528 gramos de Ácido Ascórbico y 100 mililitros de reactivo A. Este reactivo debe prepararse el día que se necesita (3).

RECOMENDACIÓN:

- ❖ Esta solución debe prepararse el día que va utilizarse.

Estándar de Fósforo (1000 ppm)

Se pesan 4.394 gramos de KH_2PO_4 y vacían en un matraz volumétrico (1000 mililitros). Luego se disuelve el KH_2PO_4 y se agrega agua destilada hasta aforar a 1000 mililitros (3).



Fuente: Laboratorio de suelos del Centro Universitario de Oriente.

Figura 1. Espectrofotómetro (Spectronic 20)

El Espectrofotómetro (Spectronic 20) se usa para determinar Fósforo, mediante la medición del porcentaje de transmitancia de las muestras de suelo a 880 nanómetros.

Para determinar los índices de disponibilidad de potasio se hace uso del mismo reactivo de extracción usado en la determinación de fósforo. El estándar se prepara de la siguiente manera:

Estándar de Potasio (1000 ppm)

Se pesan 1.908 gramos de KCl, se vacían en un matraz volumétrico de 1000 mililitros y se agrega agua destilada hasta aforar a 1000 mililitros (3).

El equipo empleado se describe a continuación, ver figura 2:



Fuente: Laboratorio de suelos del Centro Universitario de Oriente.

Figura 2. Espectrofotómetro de absorción atómica.

Espectrofotometría de absorción atómica, es una técnica muy relacionada con la fotometría de llama ya que se utiliza una llama para atomizar la disolución de la muestra de modo que los elementos a analizar se encuentran en forma de vapor de átomos. Ahora bien, en absorción atómica existe una fuente independiente de luz monocromática, específica para cada elemento a analizar y que se hace pasar a través del vapor de átomos, midiéndose posteriormente la radiación absorbida (13).

La absorción atómica es una técnica que presenta menos interferencias y es más simple que la fotometría de llama, lo que explica el espectacular desarrollo de la técnica en los últimos años. Hay que señalar que a pesar de ello, la absorción atómica no ha eliminado el uso de la fotometría, sino que ambos métodos deben considerarse

complementarios, siendo la sensibilidad de cada uno de ellos superior a la del otro para determinados elementos (13).

- **Procedimiento simplificado propuesto por la Universidad de Brigham Young**

Básicamente consiste en la extracción de suelo con agua caliente presurizada. De dicha extracción se determina el contenido del nutriente cuantificado con técnicas colorimétricas o turbidimétricas (7).

Para determinar los índices de disponibilidad de fósforo se hace uso de los siguientes reactivos y equipo:

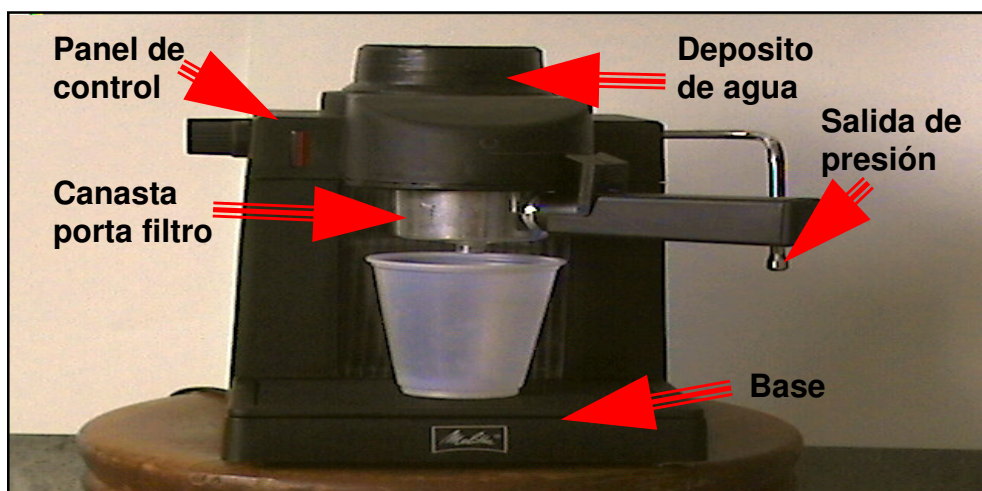
Reactivo A

Se disuelve 12.0 gramos de Molibdato de Amonio en 250 mililitros de agua destilada. También se disuelve 0.2908 gramos de Tartrato de Antimonio-potasio en 100 mililitros de agua destilada. Se agrega 148 mililitros de H_2SO_4 concentrado en un matraz de 1000 mililitros y se afora con agua destilada. Finalmente se Mezcla las tres soluciones en un matraz volumétrico (2000 mililitros) y agrega agua destilada hasta aforar a 2000 mililitros (3).

Reactivo B

Se disuelve 0.528 gramos de Ácido Ascórbico y 100 mililitros de reactivo A. Este reactivo debe prepararse el día que se necesita (8).

El procedimiento emplea los reactivos A y B al igual que la metodología Carolina del Norte, difiriendo de ésta, en que, no hace uso del reactivo de extracción, sino, la extracción se hace con la percoladora de café expreso, ver figura 3 (3).



Fuente: Laboratorio de suelos del Centro Universitario de Oriente.

Figura 3. Percoladora de café expresso usada para obtener el extracto del suelo.

El calor y presión son los responsables de que en el extracto sólo salgan los nutrientes. Se ha dicho que existe cierta relación entre la fuerza del vapor liberado y la textura del suelo, refiriéndose a que es más fuerte cuando la textura es más fina, es decir, contiene más arcilla. Al final en la canasta porta filtro de la percoladora de café expresso sólo deberá haber suelo, para asegurar que la extracción fue exitosa (7).

Además al igual que en la metodología de Doble Ácido Diluido hace uso del Spectronic 20, para medir la transmitancia de las muestras.

Para determinar los índices de disponibilidad de potasio se hace uso de los siguientes reactivos y equipo (7):

Solución ácido acético etelinediaminetetra (EDTA)

Se coloca 15 gramos de EDTA en un matraz de 1000 mililitros de volumen, agrega 88 ml de 1.0N de NaOH y afora con agua destilada a 1000 mililitros (7).

Solución formaldehído

Se diluye Formaldehído con agua destilada en una relación 1:1 (7).

Solución formaldehído y EDTA

Se mezcla EDTA y Formaldehído, usando respectivamente la relación 2:1 (7).

RECOMENDACIÓN:

- ❖ Esta solución debe prepararse el día que va ser utilizada.

Solución de goma ghatti o gum arabic

Se mezcla 5 gramos de polvo de Goma Ghatti con 500 mililitros de agua destilada. Se agita la solución antes de usar (7).

Solución sódica de borato tetrafenílico

Se disuelve 5 gramos de Borato Tetrafenílico de Sodio en 50 mililitros de agua destilada. Luego se transfiere la solución a un matraz volumétrico de 100 mililitros y agrega 10 mililitros de 01.N de NaOH. Posteriormente se afora la solución a 100 mililitros. La solución debe tomar un color ámbar (7).

RECOMENDACIONES:

- ❖ Esta solución no debe ser utilizada más allá de 1 mes a partir del día en que fue preparada.
- ❖ Debe filtrarse la solución con papel filtro No. 5 110 mm en caso de no tener un color ámbar claro. Una coloración café o sucia indica que hay potasio, el cual puede provenir de contaminación con otros químicos.

6.1.6 EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SUELOS

Las expresiones más usadas de los análisis de suelos se hacen en base a porcentaje (%), miliequivalentes por 100g de suelo (meq/100g), miliequivalentes por litro (meq/l) y partes por millón (p p m). Es muy frecuente encontrar resultados expresados en kilogramos por hectárea. Esta última forma de expresión se relaciona con el peso de una hectárea a una profundidad determinada, y ésta a su vez depende de la densidad (10).

❖ **Porcentaje**

Son las partes de un constituyente en 100 partes del material analizado. Es común su uso en las siguientes determinaciones: carbón orgánico, materia orgánica, nitrógeno total, carbonato de calcio, saturación de bases, sodio intercambiable y constantes de humedad (10).

❖ **Partes por millón**

Es el número de partes en un millón de partes de su misma especie. Se utiliza en las siguientes determinaciones: fósforo, potasio y micronutrientes, etc. Su uso es muy frecuente, ya que de partes por millón se puede pasar a por ciento y miliequivalente o viceversa (10).

❖ **Miliequivalentes por 100g de suelo**

Son expresiones comunes en los análisis de cationes cambiables, capacidad de intercambio de cationes y aniones solubles. El equivalente gramo de un elemento es la cantidad de dicho elemento que se combina o desplaza un átomo- gramo de hidrógeno. El miliequivalente es igual al peso equivalente dividido por mil. El equivalente químico de un elemento es igual al peso atómico dividido por su valencia común (10).

6.1.7 CORRELACION DE METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE SUELOS

Para establecer que tan asociadas están dos o más variables en cuanto a la variabilidad que tienen en común (por ejemplo: metodologías, dosis, etc.), se hace uso comúnmente de la medida de tendencia llamada: análisis de correlación lineal.

❖ **ANÁLISIS DE CORRELACIÓN LINEAL**

El coeficiente de correlación presenta el grado de covariación entre dos variables, pero también se puede interpretar como una medida de la

exactitud del ajuste de la recta de regresión. El uso más adecuado es en los casos en que no hay dirección de dependencia. El análisis de correlación es técnicamente neutral no prueba causa y efecto (16).

Coefficiente de correlación lineal r

Es la medida de la intensidad de la relación lineal entre dos variables. El coeficiente refleja el grado de relación o efecto que tiene el cambio de una variable sobre la otra. El valor del coeficiente de correlación lineal ayuda a contestar la pregunta: ¿existe correlación entre las dos variables consideradas? El coeficiente siempre tiene un valor entre -1 y +1. Un valor igual a +1, o bien -1 indica una **correlación positiva o una correlación negativa perfecta**, respectivamente (9).

6.2 MARCO REFERENCIAL

6.2.1 PROCEDENCIA DE LAS MUESTRAS DE SUELOS ANALIZAR

Las muestras de suelos a ser analizadas, fueron recolectadas de diferentes zonas del país, para que sean representativas de la variabilidad de suelos. La recolección fue realizada por estudiantes de la Universidad de Brigham Young, obteniendo un número variable de muestras de los diferentes puntos del país, ver cuadro 1.

Cuadro 1. Lugares de muestreo y número de muestras

Lugar	Número de muestras
Costa Sur	19
Cobán	21
Lago de Izabal	20
Petén, alrededor de Chisec	16
Región de los volcanes, en la parte oeste	20
Chiquimula, en el municipio de San Juan Ermita.	19

Para referenciar geográficamente los lugares de muestreo ver el anexo 1. Para cultivos y nombres específicos de dónde se obtuvieron las muestras, ver anexos 4 , 5, 6, 7, 8 y 9.

6.2.2 INVESTIGACIONES REALIZADAS SOBRE METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE SUELOS

❖ Comportamiento y manejo del fósforo en la fertilización de caña de azúcar en suelos de origen volcánico, Guatemala.

En 1998 se analizaron con la colaboración del laboratorio de soluciones analíticas 40 muestras de suelo de 10 sitios experimentales de fósforo con tres métodos de extracción que fueron los siguientes (11):

1. Carolina del Norte (Mehlich 1) 0.05M HCl +0.0125 M H₂SO₄ (Mehlich, 1953).
2. Carolina del Norte (Mehlich 3) 0.2 M Ac. Acético + 0.25 M NH₄-NO₃ + 0.015 M NH₄F + 0.13 M CHNO₃ + 0.001M EDTA (Mehlich, 1984).
3. Resina de intercambio. Remoción de fósforo por resina aniónica sin alteración de pH (Cooperband and Logan, 1992).

Se realizó análisis de correlación lineal con los datos de fósforo extractable de cada método con los otros (11).

Es evidente la alta correlación lineal positiva entre los valores de fósforo extraídos con los tres métodos, alcanzando coeficientes de correlación hasta de 0.98 (Mehlich versus Resina). La correlación altamente significativa encontrada entre los tres métodos de extracción de fósforo para estos suelos es importante e indica que puede utilizarse indistintamente cualquiera de ellos en la medición. Esta flexibilidad permite escoger aquél método menos complicado, más rápido y práctico (11).

Un número grande de muestras de suelo (347 muestras) fue analizado más adelante con Mehlich 1 y Mehlich 3 (Métodos rutinarios utilizados en Guatemala). Los resultados indicaron una significativa correlación con un coeficiente de correlación de (r) de 0.77 entre estas dos metodologías. Para el efecto se estableció una relación lineal (regresión lineal) de Mehlich 1 = $0.889 + 0.747$ (Mehlich 3); (R^2 0 0.60). La relación indica que Mehlich 3 extrae un poco más fósforo que Mehlich 1 en éstos suelos (11).

Se establecieron 3 rangos de interpretación de análisis de fósforo (mehlich 1) (11).

Bajo: < 10 ppm

Medio: $\geq 10 - 20$ ppm

Alto: ≥ 30 ppm

❖ **Otras investigaciones**

Otros estudios de correlación de metodologías de extracción de Fósforo, como en suelos de California que mostraron más de 0.13 ppm de Fósforo en el extracto de agua no respondieron en rendimiento a la fertilización fosforada (Bingham, 1949; Martin & Buchanan, 1950; Martin & Mikkelsen, 1960). Thompson et al. (1960) encontraron una alta correlación entre el Fósforo tomado por el cultivo de sorgo y el Fósforo soluble en 22 suelos, la mayoría de los cuales eran ácidos. Fried y Shapiro (1956) observaron una pobre relación entre el Fósforo soluble en agua y el Fósforo tomado en 8 suelos ácidos en el extracto inicial, pero observaron una correlación mucho mejor en los 14 extractos sucesivos (1).

VII. METODOLOGÍA

7.1 DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES DE DISPONIBILIDAD DE FÓSFORO Y POTASIO

7.1.1 METODOLOGÍA DE DOBLE ÁCIDO DILUIDO

Se obtuvo los índices de disponibilidad de fósforo y potasio de 115 muestras de suelos. Se efectuaron tres réplicas para la metodología simplificada de la Universidad de Brigham Young y una réplica para la metodología de Doble Ácido Diluido.

- **DETERMINACIÓN DE FÓSFORO**

Para la **obtención del extracto**, inicialmente se pesó 5 gramos de suelo que fueron vaciados en un matraz. Luego se agregó 25 mililitros del Reactivo de Extracción y se agitó en el agitador eléctrico durante 5 minutos. Seguidamente se filtró la mezcla utilizando papel filtro No. 5 110 mm y recogió el extracto.

La **solución para la lectura**, se preparó tomando con una pipeta automática 2 mililitros del extracto que se vaciaron en un matraz, donde se agregó 18 mililitros de agua destilada y 5 mililitros del Reactivo B. Posteriormente se dejó en reposo la solución por 15 minutos para fomentar el color, que se tornó azul intenso, en el caso de un alto índice de disponibilidad de fósforo en la solución.

La **lectura del índice de disponibilidad de Fósforo** en la solución se hizo con base al porcentaje de transmitancia de la muestra en el espectrofotómetro (Spectronic 20) a una frecuencia 880 nanómetros, habiéndose colocado también el filtro rojo del aparato.

Finalmente se obtuvo el índice de disponibilidad de fósforo en el suelo, usando la tabla en la cual ya están determinadas las partes por millón

(ppm) para cada posible lectura de un porcentaje de transmitancia (%T), ver cuadro 2 en anexo 2.

- **DETERMINACIÓN DE POTASIO**

Debido a que se realiza el mismo procedimiento que para la obtención del extracto para la determinación de fósforo, se utilizó parte de ese extracto del cual con una pipeta automática se sacó 1 mililitro y vació en un matraz, dónde se agregó 24 mililitros de agua destilada.

Seguidamente se elaboró los **estándares** de 2, 6 y 12 partes por millón de potasio, que corresponden respectivamente al S_1 , S_2 y S_3 . Aunque previo a esto se elaboró estándares de 100 partes por millón del S_1 , S_2 y S_3 utilizando 5, 15 y 30 mililitros respectivamente de la solución de 1,000 ppm de potasio y se aforaron a 100 mililitros con agua destilada. Finalmente se tomó 1 ml de cada uno de los estándares de 100 partes por millón del S_1 , S_2 y S_3 y agregó a cada uno 24 mililitros de agua destilada.

La **lectura del índice de disponibilidad de potasio** en la solución se inició calibrando el espectrofotómetro de absorción atómica introduciendo los estándares (2, 6 y 12 ppm), y luego se colocaron los extractos y tomó las lecturas. Las lecturas fueron multiplicadas por el factor de dilución 125 para obtener las partes por millón de K en el suelo. Dicho factor se obtiene por la relación de 5 grs de suelo:25 ml de solución extractora, lo que da una relación de 5, el cual debe multiplicarse por la sumatoria de 1 ml del extracto de suelo + 24 ml de agua destilada, es decir 25 ml.

7.1.2 PROCEDIMIENTO SIMPLIFICADO DE LA UNIVERSIDAD DE BRIGHAM YOUNG

Con este procedimiento se hizo 3 réplicas por cada muestra de las 115 muestras de suelos en las que se determinaron los índices de disponibilidad de fósforo y potasio. Así mismo, se usó una muestra estándar. Ésta muestra formó parte de cada 30 muestras analizadas y su uso se

fundamentó en que permitió verificar si los instrumentos y equipos estaban siendo utilizados adecuadamente, y también, si los procedimientos de las metodologías fueron correctamente desarrollados. Evitando de este modo variaciones significativas en los resultados obtenidos de los análisis.

- **DETERMINACIÓN DE FÓSFORO**

Previo a realizar la extracción de nutrientes de las muestras de suelos a analizar, se preparó la **Percoladora de café expresso** para uniformizar su temperatura y obtener resultados confiables.

Se preparó la **Percoladora de café expresso** agregando 100 mililitros de agua destilada al depósito de agua. Luego se puso a funcionar la percoladora de café expresso y se colocó un recipiente en la base para recibir el agua. Cuando ya no salió más agua por el filtro se dejó salir el vapor. Este proceso se realizó dos veces.

El **extracto con los nutrientes** se obtuvo vaciando 5 gramos de suelo en la canasta porta filtro de la percoladora de café expresso, sobre un trozo de papel filtro No. 5 110 mm que fue previamente humedecido con agua destilada. Se agregó 100 mililitros de agua destilada en el depósito de la percoladora de café expresso y seguidamente se encendió la percoladora de café expresso para obtener el extracto que se recibió en un recipiente colocado en la base. Se consideró concluido el proceso de extracción cuando ya no salió más extracto por la canasta porta filtro. Finalmente se dejó salir el vapor antes de procesar la siguiente muestra.

Este extracto fue dividido volumétricamente en dos partes iguales, utilizando una para efectuar la determinación de P y la otra para la determinación de K.

La ***solución para la lectura***, se preparó vaciando 10 mililitros de agua destilada en un matraz, a los cuales se agregó 5 mililitros del extracto obtenido de la percoladora de café expreso y 5 mililitros del Reactivo B. Lo anterior se hizo con cada extracto de suelo y el testigo (agua destilada). Luego se agitó manualmente de forma leve la solución y se esperó 15 minutos antes de hacer la lectura.

Se ***calibró*** a 880 nanómetros con el filtro rojo el Espectrofotómetro (Spectronic 20) a cero y a cien por ciento de transmitancia para obtener lecturas confiables. Para colocarlo a cero por ciento de transmitancia, se utilizó el botón de encendido sin ninguna muestra. Luego para colocarlo a 100% la transmitancia se introdujo en el Espectrofotómetro (Spectronic 20) un tubo de ensayo especial para este equipo con agua destilada y giró hacia la derecha el botón que se encuentra al lado del de encendido hasta obtener 100% de transmitancia.

La ***lectura del índice de disponibilidad de fósforo*** en la solución, se hizo con base al porcentaje de transmitancia, para lo cual se utilizó el Espectrofotómetro (Spectronic 20).

Con el objeto lavar el tubo en donde se colocó la solución y evitar que restos del extracto medido anteriormente afectaran la nueva lectura, se agregó al tubo un poco del extracto al cual pretendía medírsele la transmitancia y se desechó. Luego se midió la transmitancia del resto del extracto.

- ***DETERMINACIÓN DE POTASIO***

El extracto utilizado se obtuvo del procedimiento para la determinación de fósforo. Se agregó más o menos 1 gr de Hidróxido de Calcio al extracto y se agitó manualmente para luego filtrarlo. La cantidad de hidróxido de calcio usada dependió de la intensidad de la turbidez del extracto.

La ***solución para la lectura*** se preparó vaciando 3 mililitros de EDTA + Formaldehído (relación 2:1) en un matraz, a los cuales se agregó 1 mililitro de extracto, 3 gotas de Goma Ghatti o Gum Arabic y se mezclaron, moviendo manualmente en forma circular el matraz con la solución. Posteriormente se agregó 1 mililitro de Borato Tetrafenílico (útil 1 mes) y se esperó durante 15 minutos. Los estándares (2, 4, 6, 8, 10 ppm K) fueron procesados como el extracto de las muestras de suelo analizadas.

Se **calibró** a 420 nanómetros sin el filtro rojo el Espectrofotómetro (Spectronic 20) a cero y a cien por ciento de transmitancia para obtener lecturas confiables, esto se realizó como se indicó para el caso de fósforo.

La ***lectura del índice de disponibilidad de potasio*** en la solución, se hizo de igual manera que para el fósforo.

- **OBTENCIÓN DE LAS PARTES POR MILLÓN DE “P” y “K” EN EL SUELO**

Para determinar los índices de disponibilidad de Fósforo en el suelo se utilizó la tabla del anexo 2. Porcentajes de Transmitancia y partes por millón de Fósforo de la metodología de Doble Ácido Diluido.

Para determinar los índices de disponibilidad de Potasio en la solución se convirtieron las transmitancias a logaritmos, luego se trazo una curva considerando en el eje de las ordenadas como variable dependiente los logaritmos de las transmitancias y en el eje de las abscisas como variable independiente las partes por millón conocidas de los estándares (0, 2, 4, 6, 8 y 10 ppm de Potasio) haciendo un total de 72 valores (6 estándares, 3 réplicas por 4 grupos de 30 muestras incluyendo el estándar de suelo). Se encontró que el mejor modelo fue el lineal, debido a que presentó el más alto coeficiente de determinación con un valor de 0.81 y mayor significancia,

ver figura 4. Luego se despejó de este modelo la variable independiente que era la desconocida en el caso de las muestras de suelo, es decir, las partes por millón, quedando la ecuación como sigue:

$$X = Y - 103.64 / 3.4262.$$

Donde:

X = partes por millón. Y = % de Transmitancia.

Una vez determinados los índices de disponibilidad de Potasio en las soluciones mediante la aplicación de la ecuación, se multiplicaron por 20, que es el factor de dilución, obtenido de la relación suelo: agua en la Percoladora de café expreso (5:100) para obtener los índices de disponibilidad de Potasio en las muestras. Mismo procedimiento se siguió para la determinación de las ppm de Nitrógeno, la ecuación y su coeficiente de determinación se muestran a continuación.

$$X = Y - 89.146 / 6.9382$$

Donde:

X = partes por millón. Y = % de Transmitancia.

El procedimiento simplificado BYU para Potasio, mostró una significativa variación de los valores obtenidos en cada réplica de sus estándares, de igual manera sucedió con los valores de las muestras de suelo.

7.2 Correlación de las metodologías de análisis de suelos

Una vez obtenidos los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio en los suelos y expresados en partes por millón con cada metodología de análisis de suelos. Se realizó una estratificación de acuerdo a la disponibilidad del nutrimento (bajo, medio, alto y muy alto), utilizando la tabla de parámetros para interpretación de resultados de análisis de suelos obtenidos con el método de extracción de Doble Ácido Diluido, generada por ANACAFÉ, ICTA y FAUSAC, para luego poder efectuar correlaciones según la estratificación definida. Para establecer el grado de correlación se utilizó la siguiente regla de decisión.

Cuadro 2. Regla de decisión del Coeficiente de Correlación

Si r es > 0	Existe correlación
Si r es < 0	No existe correlación
Si r : $0 - 0.4$	Correlación baja
Si r : $0.4 - 0.7$	Correlación media
Si r : $0.7 - 1.0$	Correlación alta

7.3 Comparación de los tiempos, procesos y costos variables de las metodologías para determinar Fósforo y Potasio.

Para determinar que metodología de las correlacionadas fue más rápida, se elaboró un diagrama de flujo de proceso y cronometró cada una de las operaciones necesarias para la determinación de los índices de disponibilidad de fósforo y potasio. En cuanto al costo invertido por análisis, éste se realizó utilizando los costos variables en los que se infirió con cada metodología.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSION

8.1 Determinación de índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio

8.1.1 Índices de disponibilidad de Fósforo

Los índices de disponibilidad de Fósforo de las 115 muestras de suelo, se obtuvieron con las metodologías DAD (Doble Ácido Diluido) y Procedimiento BYU (Procedimiento Simplificado de la Universidad de Brigham Young), (ver anexos 10-15).

Los índices de las dos metodologías se plotearon en un gráfico de dispersión, observándose que los mismos aparecen distribuidos en un rango de 0 a 90 ppm. El 54% de los índices se encuentran en el rango de 0-10 ppm, el 15.5% en el rango de 10-30 ppm y el 30.5% restante de los índices de disponibilidad mayores de 30 ppm, (Figura 6).

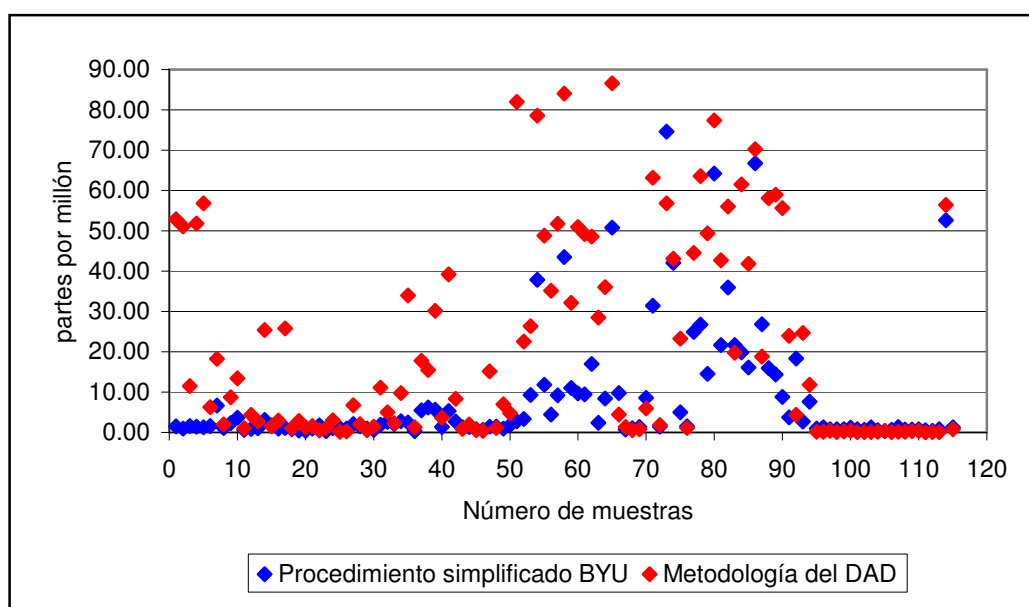


Figura 4. Índices de disponibilidad de Fósforo obtenidos con el procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young y la metodología de Doble Ácido Diluido.

En el gráfico de dispersión de los índices de disponibilidad de Fósforo, se observa que en el rango de 0-10 ppm y los mayores a 30 ppm, las dos

metodologías presentan un mayor grado de relación, en comparación al rango de 10-30 ppm.

8.1.2 Índices de disponibilidad de Potasio.

Se obtuvo los índices de disponibilidad de Potasio de las 115 muestras de suelo con las metodologías en estudio, y plotearon en un gráfico de dispersión. Los índices aparecen en un rango de 0 a 1.5 meq/100 gr de suelo. El 21.0% de los índices se encuentra en el rango de 0.1-0.3 meq/100 gr de suelo; el 9.0% entre el rango de 0.3-0.4 meq/100 gr de suelo; el 67.0% entre el rango de 0.4-1.1 meq/100 gr de suelo y el 3% restante están más allá de los 1.1 meq/100 gr de suelo (Figura 12).

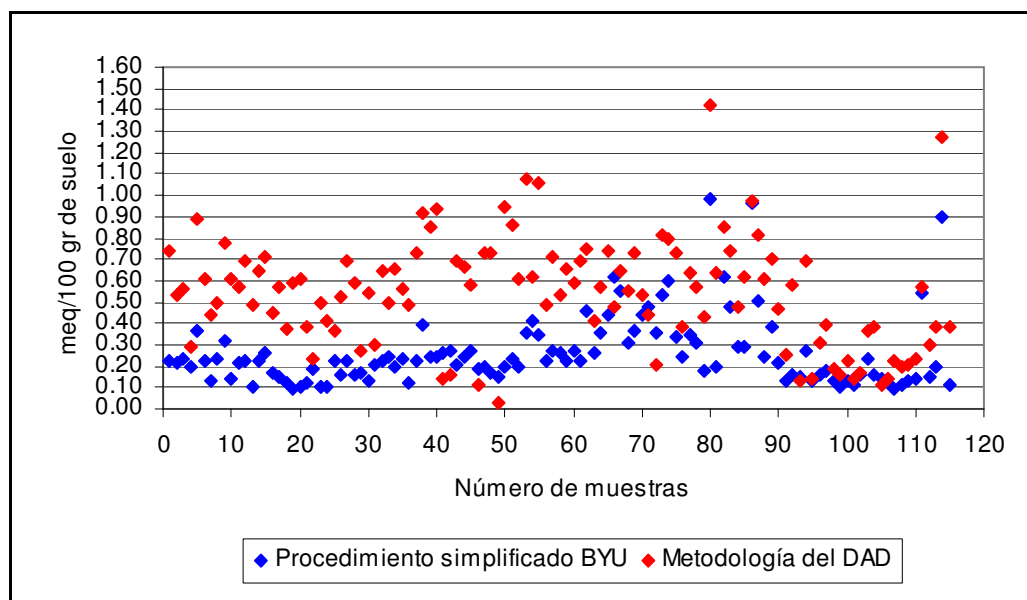


Figura 5. Índices de disponibilidad de Potasio obtenidos con el procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young y la metodología de Doble Ácido Diluido.

Se observa en el gráfico de dispersión para los índices de disponibilidad de Potasio, que la mayoría de los índices obtenidos con el Procedimiento BYU, presentaron valores más bajos, en relación con los de la metodología del DAD.

8.2 Análisis de Correlación de las metodologías de Doble Ácido Diluido y el Procedimiento Simplificado BYU.

8.2.1 Análisis de Correlación para Fósforo

Los índices de disponibilidad de Fósforo se estratificaron usando los parámetros de decisión: bajo, medio, alto y muy alto definidos para la metodología del DAD, con el fin de estimar de mejor forma la relación entre las metodologías (Anexo 3).

El análisis de correlación se realizó para cada uno de los estratos definidos y para todos los datos en general, (Cuadro 3).

Cuadro 3. Correlaciones para Fósforo entre las metodologías de análisis de suelos de Doble Ácido Diluido y el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young.

Índice de disponibilidad	Número de muestras	Coeficiente de correlación r
0 – 10 ppm (Bajo)	62	0.37
10 – 15 ppm (Medio)	4	0.23
15 – 30 ppm (Alto)	14	-0.29
> 30 ppm (Muy alto)	35	0.53
Incluye todas	115	0.70

El análisis de correlación con todas las muestras de suelo, presentó una correlación de 0.70, considerada como media. Esto difiere a lo observado en las correlaciones por estratos, ya que el 71% de los índices de disponibilidad de Fósforo, presentan una baja correlación entre el procedimiento simplificado BYU y la metodología del DAD.

La correlación entre las dos metodologías incluyendo todos los índices de disponibilidad de Fósforo, puede ocultar la verdadera relación entre ambas, porque la variabilidad se reduce cuando la cantidad de datos es mayor.

De acuerdo al análisis de correlación por estratos, la mayor correlación entre las metodologías es de 0.53, considerada como media, y se obtuvo en el rango de más de 30 ppm de Fósforo, definido como muy alto por la metodología del DAD.

Para los estratos de 0-10 ppm, 10-15 ppm y 15-30 ppm de Fósforo, las correlaciones entre las metodologías fueron bajas, con coeficientes que varían desde -0.29 hasta 0.37.

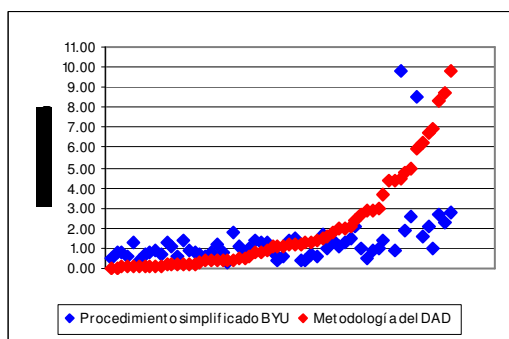


Figura 6. Índices de disponibilidad de Fósforo de 0-10 ppm (Bajo).

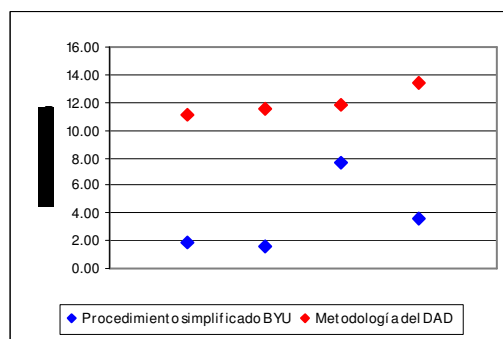


Figura 7. Índices de disponibilidad de Fósforo de 10-15 ppm (Medio).

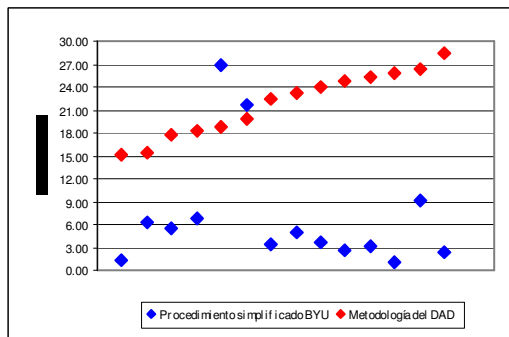


Figura 8. Índices de disponibilidad de Fósforo de 15-30 ppm (Alto).

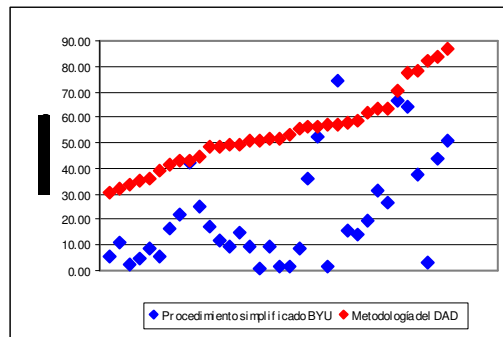


Figura 9. Índices de disponibilidad de Fósforo > 30 ppm (Muy alto).

El Procedimiento simplificado BYU, presenta mayor similitud en la extracción de Fósforo en comparación a la metodología del DAD, en suelos con índices de disponibilidad bajos (0-10ppm) y suelos con índices muy altos (>30ppm), no así en los índices medios y altos (10-30 ppm). En forma

general en este estudio, la correlación es baja entre las metodologías de análisis de suelos, (Figuras 8 y 11).

8.2.2 Análisis de Correlación para Potasio

Los índices de disponibilidad de Potasio fueron también estratificados utilizando los parámetros de decisión: bajo, medio, alto y muy alto definidos para la metodología del DAD, con la finalidad de encontrar de la manera más idónea la relación entre las dos metodologías (Anexo 3).

Se realizaron análisis de correlación entre el procedimiento simplificado BYU y la metodología del DAD por cada estrato definido, y uno incluyendo el total de los índices de disponibilidad de las 115 muestras de suelo, (cuadro 4).

Cuadro 4. Correlaciones para Potasio entre las metodologías de análisis de suelos de Doble Ácido Diluido y el procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young.

Índice de disponibilidad	Número de muestras	Coeficiente de correlación r
0.1 – 0.3 meq/100gr (Bajo)	24	0.07
0.3 – 0.4 meq/100gr (Medio)	10	0.05
0.4 – 1.1 meq/100gr (Alto)	77	0.41
> 1.1 meq/100gr (Muy alto)	4	0.96
Incluye todas	115	0.63

En el cuadro 4, se puede observar que el 70% de los índices de disponibilidad de Potasio presentaron una media correlación, estableciéndose que existe de manera global una baja correlación entre el Procedimiento simplificado BYU y la metodología del DAD, para la extracción de Potasio. En la Figura 7, puede observarse que el 74% de los

índices de Potasio obtenidos con el procedimiento simplificado BYU fueron notablemente inferiores a los obtenidos con la metodología del DAD.

La mayor correlación entre las metodologías de análisis de suelos de acuerdo a los estratos, fue de 1.0, considerada como alta, se obtuvo cuando los índices de disponibilidad fueron mayores a 1.1 meq/100gr, considerados como índices muy altos según la metodología del DAD. Sin embargo, el número de muestras utilizado para esta correlación es muy pequeño, por lo tanto se considera que no es representativa de correlaciones por estratos. No así, la correlación de 0.40, considerada como baja, encontrada para el estrado de 0.4 – 1.1 meq/100gr, rango dentro del cual los índices son definidos como altos según la metodología del DAD, en el cual se incluyen el 69% de los índices.

Para los estratos de los rangos 0.1 – 0.3 meq/100gr y 0.3 – 0.4 meq/100gr, las correlaciones entre las metodologías fueron bajas, variando de 0.05 hasta 0.07.

El Procedimiento simplificado BYU, no presenta una buena similitud en la extracción de Potasio en comparación a la metodología del DAD, en suelos con índices de disponibilidad bajos (0.1-0.3 meq/100 gr) y medios (0.3-0.4 meq/100 gr), (Figuras 12 y 13).

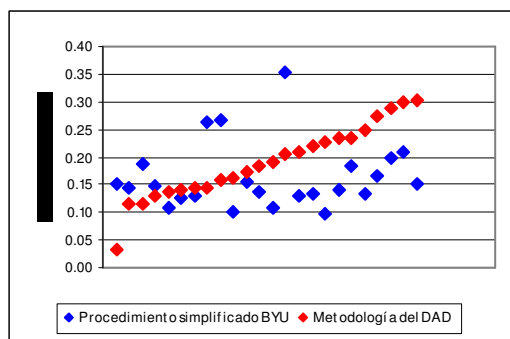


Figura 10. Índices de disponibilidad de Potasio de 0.1-0.3 meq/100 gr de suelo

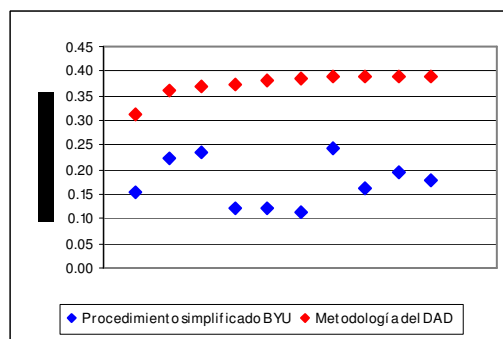


Figura 11. Índices de disponibilidad de Potasio de 0.3-0.4 meq/100gr de suelo

(Bajo).

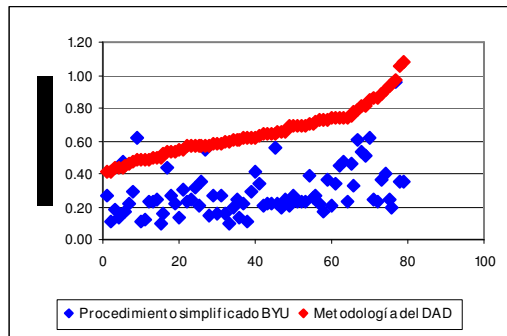


Figura 12. Índices de disponibilidad de Potasio de 0.4-1.1 meq/100 gr de suelo (Alto).

(Medio).

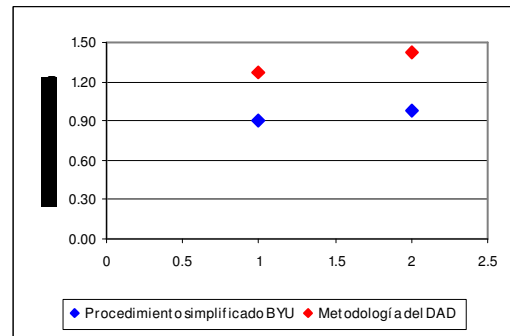


Figura 13. Índices de disponibilidad de Potasio > 1.1 meq/100 gr de suelo (Muy alto).

8.3 Comparación de tiempos, procesos y costos variables de las metodologías para determinar Fósforo y Potasio.

8.3.1 Comparación de tiempos y procesos de las metodologías para determinar Fósforo y Potasio

Las actividades y sus respectivos tiempos, para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio, con el Procedimiento BYU y la metodología del DA, se representaron en un diagrama de flujo de proceso, (ver anexos del 16 al 19).

La comparación entre las metodologías de análisis de suelos, se hizo utilizando los cuadros resumen, que se obtuvieron al final de analizar los diagramas de flujo de proceso.

Cuadro 5. Cuadro resumen del diagrama de flujo de proceso para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo con la metodología de Doble Ácido Diluido.

SIMBOLO	ACTIVIDAD	CANTIDAD	TIEMPO
---------	-----------	----------	--------

	Almacén	1	0
	Operación	6	900 segundos.
	Inspección	0	0
	Oper/Inspecc.	2	1043 segundos.
	Demoras	1	900 segundos.
TOTAL			2,843 segundos ó 47.38 minutos.

En los cuadros 5 y 6, se observa que para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo, el procedimiento simplificado BYU fue 5 minutos más rápido que la metodología del DAD, sin embargo, su ejecución requirió la realización del doble de operaciones en relación a la metodología del DAD.

Cuadro 6. Cuadro resumen del diagrama de flujo de proceso para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo con el procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young.

SIMBOLO	ACTIVIDAD	CANTIDAD	TIEMPO
	Almacén	1	0
	Operación	12	1,135 segundos.
	Inspección	0	0
	Oper/Inspecc.	3	208
	Demoras	2	1,200 segundos.
TOTAL			2,543 segundos ó 42 minutos.

En los cuadros 7 y 8, se observa que para la determinación de los índices de disponibilidad de Potasio, la metodología del DAD fue 13 minutos más rápida que el Procedimiento BYU, además, la aplicación del Procedimiento BYU requirió del doble de operaciones en relación a la metodología del DAD.

Cuadro 7. Cuadro resumen del diagrama de flujo de proceso para la determinación de los índices de disponibilidad de Potasio con la metodología de Doble Ácido Diluido.

SIMBOLO	ACTIVIDAD	CANTIDAD	TIEMPO
	Almacén	1	0
	Operación	6	720 segundos.
	Inspección	0	0
	Oper/Inspecc.	3	1163 segundos.
	Demoras	1	900 segundos.
TOTAL			2,783 segundos ó 46.38 minutos.

Cuadro 8. Cuadro resumen del diagrama de flujo de proceso para la determinación de los índices de disponibilidad de Potasio con el procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young.

SIMBOLO	ACTIVIDAD	CANTIDAD	TIEMPO
	Almacén	1	0
	Operación	12	1,255 segundos.
	Inspección	0	0
	Oper/Inspecc.	5	1,173
	Demoras	2	1,200 segundos.
TOTAL			3,628 segundos ó 60 minutos.

En conclusión, la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo, es más rápida con el Procedimiento simplificado BYU que con la metodología del DAD. Sin embargo, la determinación de los índices de disponibilidad de Potasio es más rápida con la metodología del DAD que con el Procedimiento simplificado BYU.

En cuanto a las operaciones realizadas, el Procedimiento simplificado BYU, duplicó el número de éstas, en relación a la metodología del DAD, tanto para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo, como para la determinación de los índices de disponibilidad de Potasio,

8.3.2 Comparación de costos variables de las metodologías para determinar Fósforo y Potasio

Otra variable considerada en este estudio fueron los costos variables para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio, del Procedimiento BYU y la metodología del DAD (ver los anexos 20 y 21).

Cuadro 9. Costo variable para determinar Fósforo y Potasio en 1 muestra de suelo con la metodología de Doble Ácido Diluido.

COSTOS VARIABLES	Reactivos	Costo/Q.
1.- Reactivo de extracción	1.- Ácido Clorhídrico Concentrado	Q. 0.12
	2.- Ácido Sulfúrico Concentrado	Q. 0.05
	3.- Agua destilada	Q. 1.46
2.- Reactivo "A"	1.- Molibdato de Amonio	Q. 1.70
	2.- Tartrado de Antimonio-potasio	Q. 0.07
	3.- Ácido Sulfúrico	Q. 0.98
	4.- Agua destilada	Q. 0.28
3.- Reactivo "B"	1.- Ácido Ascórbico	Q. 1.54
4.- Papel filtro No. 2 110 mm DIA PACK		Q. 23.32
5.- Agua destilada (FÓSFORO)		Q. 1.05
6.- Agua destilada (POTASIO)		Q. 1.40
7.- 5% de imprevistos		Q. 1.60
TOTAL		Q. 33.60

Cuadro 10. Costo variable para determinar Fósforo y Potasio en 1 muestra de suelo con el procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young.

COSTOS VARIABLES	Reactivos	Costo/Q.
1. Reactivo de extracción	1.- Agua destilada	Q. 0.29
2.- Reactivo "A"	1.- Molibdato de Amonio	Q. 1.70
	2.- Tartrado de Antimonio-potasio	Q. 0.07
	3.- Ácido Sulfúrico	Q. 0.98
	4.- Agua destilada	Q. 0.28
3.- Reactivo "B"	1.- Ácido Ascórbico	Q. 1.54
4.- Papel filtro No. 2 110 mm DIA PACK		Q. 11.66
5.- Agua destilada (FÓSFORO)		Q. 0.58
6.- Solución EDTA +	1.- EDTA	Q. 0.25
	3.- Formaldehído	Q. 0.69

Formaldehído	2.- Hidróxido de sodio	
--------------	------------------------	--

...continuación del cuadro 10

Cuadro 10. Costo variable para determinar Fósforo y Potasio en una muestra de suelo con el procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young.

	4.- Agua destilada	Q. 0.15
7.- Solución Borato tetrafenílico de sodio	1.- Borato tetrafenílico de sodio	Q. 29.66
	3.- Agua destilada	Q. 0.11
8.- Solución goma Gatti		
	1.- Gum Arabic	Q. 0.09
	2.- Agua destilada	Q. 0.04
9.- Hidróxido de calcio		Q. 15.91
10.- 5% de imprevistos		Q. 3.20
TOTAL		Q. 67.20

En los cuadros 9 y 10 se observa que el costo variable del Procedimiento BYU duplicó el costo variable de la metodología del DAD. Sin embargo, esto es en lo que respecta a costos variables, porque sin lugar a duda, el costo del equipo utilizado en la metodología del DAD es mucho mayor que el utilizado por el Procedimiento BYU, al menos en cuanto a la determinación del índice de disponibilidad de Potasio, en la cual se utiliza el Espectrofotómetro de Absorción Atómica. Para la determinación de Fósforo el equipo utilizado es el mismo en ambas metodologías.

IX. CONCLUSIONES

- ❖ Las correlaciones por estratos para la extracción de Fósforo, entre las metodologías de Doble Ácido Diluido y el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young fueron bajas, encontrándose dentro éstas, mejores correlaciones cuando los índices de disponibilidad fueron bajos (0-10ppm) y muy altos (>30ppm).
- ❖ Las correlaciones por estratos para la extracción de Potasio, entre las metodologías de Doble Ácido Diluido y el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young fueron bajas, encontrándose dentro de éstas, mejores correlaciones cuando los índices de disponibilidad fueron altos (0.4 – 1.1 meq/100gr) y muy altos (> 1.1 meq/100gr).
- ❖ La determinación de los índices de disponibilidad de Potasio con el Procedimiento simplificado BYU, carece de reproducibilidad, debido a que los valores de los estándares y muestras de suelo variaron significativamente en cada réplica.
- ❖ A partir de los diagramas de flujo de proceso y costos variables, para la determinación de Fósforo y Potasio, de las metodologías de Doble Ácido Diluido y el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young, la metodología del DAD es la mejor opción en cuanto al número de operaciones y costo en relación al Procedimiento simplificado BYU.

X. RECOMENDACIONES

- ❖ Las bajas correlaciones para la extracción de Fósforo, obtenidas entre el Procedimiento simplificado de la Universidad Brigham Young asociado con la metodología de Doble Ácido Diluido (DAD), indican que el Procedimiento simplificado BYU, necesita ser ajustado, con el fin de obtener extracciones de Fósforo mucho más similares a las obtenidas con la metodología del DAD.
- ❖ Las medias correlaciones por estratos encontradas para la determinación de Potasio, entre el Procedimiento simplificado de la Universidad Brigham Young y la metodología de DAD; y además la variación de los valores de los estándares y muestras de suelo en cada repetición, indican que el Procedimiento simplificado BYU, indudablemente necesita ser perfeccionado para constituirse en una metodología sustitutiva de la metodología del DAD.
- ❖ El Procedimiento simplificado de la Universidad Brigham Young, debe ser validado en campo, mediante una correlación entre la cantidad de Fósforo extraído y la respuesta de un cultivo “X” a la aplicación de Fósforo.
- ❖ Considerando los procesos y costos variables para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio, de las metodologías en estudio, debe investigarse como reducir el número de operaciones y los costos variables del Procedimiento simplificado BYU.

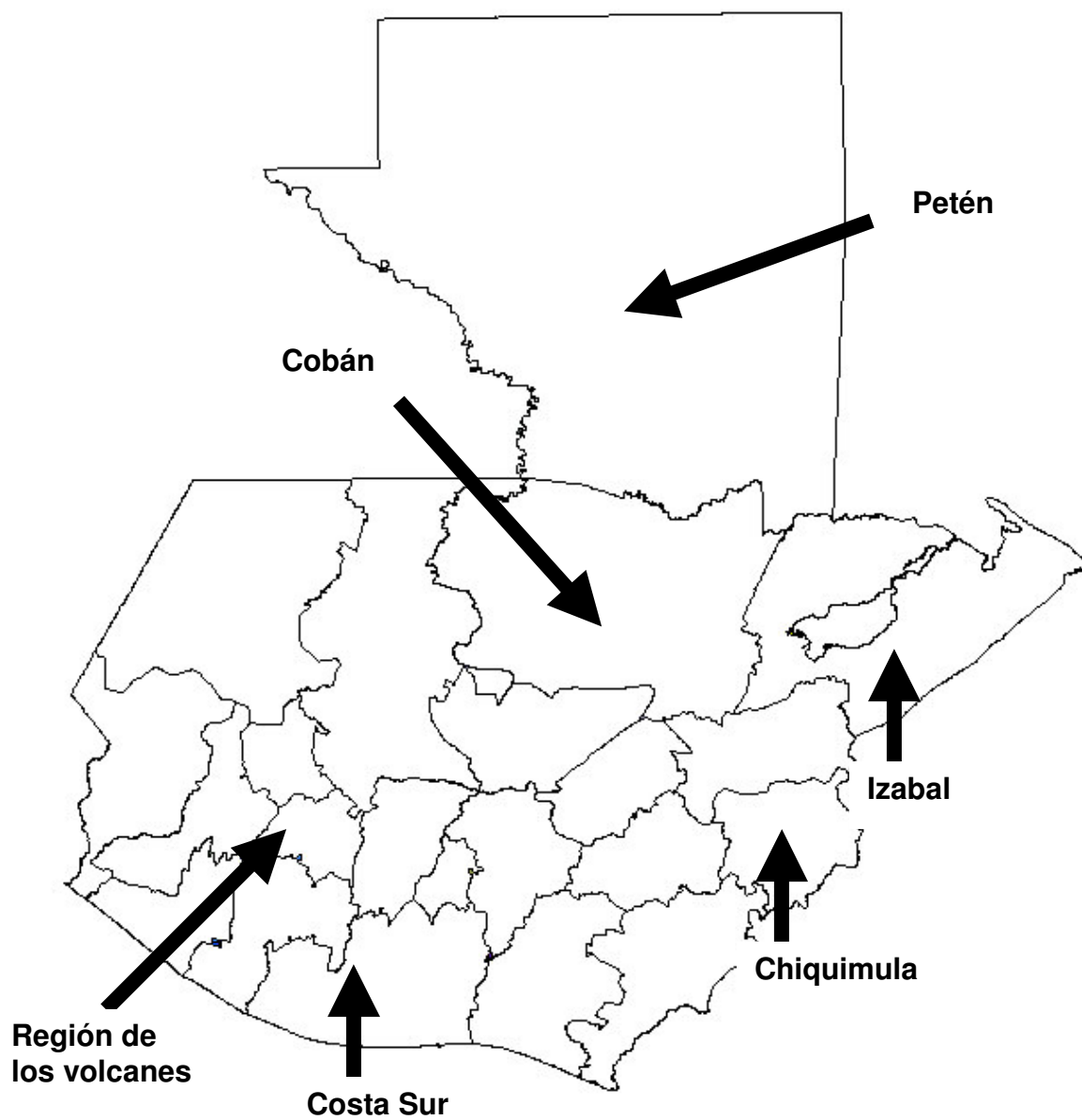
XI. BIBLIOGRAFÍA

1. Black, CA; Evans, DD; White, JJ; Ensminger, LE; Clark, FE. 1982. Methods of soil analysis: chemical and microbiological properties. Madison, Wisconsin, US, Editorial pte 2, p. 1035-1047.
2. Conti, ME. 2002. Dinámica de la liberación y fijación de potasio en el suelo (en línea). Buenos Aires, Ar. Consultado 15 nov. 2003. Disponible en <http://www.ppi-ppic.org/ppiweb/itams.nsf/87cb8a98bf72572b85256.html>
3. Diaz-Romeu, R; Hunter, A. 1982. Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigaciones en invernaderos. Turrialba, CR, Editorial p.62. (Serie materiales de enseñanza no.12.)
4. Enciclopedia práctica de la agricultura y la ganadería. 1999. Barcelona, Es, Grupo editorial Océano. p. 64-69
5. Equipo del Proyecto Fertilizar –INTA Pergamino, AR. 2002. Movilidad del fósforo en el suelo. (en línea) Argentina Consultado 14 de nov. 2003. Disponible en <http://www.fertilizar.org.ar/articulos/articulos.asp>
6. Estrada, LL. 1998. Evaluación de la fertilidad de suelos. *In* Manual agrícola Superb. Guatemala, Productos Superb. p. 71.
7. Gibson, K. 2003. Procedimiento simplificado para análisis de suelos para agricultura en pequeña escala (correo electrónico). Provo, Utah, Brigham Young University.
8. Instituto de la potasa y el fósforo, Mx. 1997. Manual internacional de fertilidad de suelos, versión española. Queretaro, Mx, Editorial del Instituto de la potasa y el fósforo. 134 p.
9. Jonson, R. 1990. Estadística elemental. México, Grupo editorial Iberoamérica. p. 99-101.
10. Palmaven (VE) 1998. Análisis de suelos y su interpretación. Venezuela, editorial PDVSA. p. 10-11. (Serie técnica).
11. Pérez, AJ et al. 2001. Evaluación de la respuesta a la fertilización fosforada en la zona cañera de Guatemala, segunda soca. *In* Memoria de presentación de resultados de investigación zafra 2000-2001. Guatemala. p. 86—90.

12. Plank 1, OC. 2003. Nutrient extraction and chemical analysis (en línea). Consultado 15 nov. 2003. Disponible en <http://www.cropsoil.uga.edu/turfExtraction/extraction.html>
13. Universidad Nacional de Educación a Distancia, ES. 2000. Mineralogía (en línea). Consultado 10 oct. 2003. Disponible en <http://www.uned.es/cristamine>
14. Urbano, PT. 1999. Tratado de fitotecnia general. 2 ed. Madrid, EC, Ediciones Mundi Prensa. p. 516- 517; 548- 549.
15. USAC (Universidad de San Carlos de Guatemala). 1993. Diagnóstico de los recursos naturales y ambiente. Guatemala, p. 70-74; 131-132.
16. Yamane, T. 1987. Estadística. Trad. N Cortado de Kohan y N. Civetta Arzagús. México, Editorial Harla. P 87.

XII. ANEXOS

Anexo 1. Procedencia de las muestras de suelos a analizar



Anexo 2. Porcentajes de Transmitancia y partes por millón de Fósforo.

% T	ppm	% T	ppm	% T	ppm	% T	ppm	% T	ppm
0.00	89.89	17.00	61.47	34.00	37.64	51.00	23.24	68.00	13.08
0.50	89.05	17.50	60.63	34.50	37.12	51.50	22.89	68.50	12.76
1.00	88.22	18.00	59.80	35.00	36.51	52.00	22.55	69.00	12.50
1.50	87.38	18.50	58.96	35.50	36.10	52.50	22.21	69.50	12.24
2.00	86.55	19.00	58.12	36.00	35.61	53.00	21.87	70.00	11.99
2.50	85.71	19.50	57.29	36.50	35.18	53.50	21.54	70.50	11.73
3.00	84.86	20.00	56.48	37.00	34.63	54.00	21.21	71.00	11.46
3.50	84.04	20.50	55.61	37.50	34.16	54.50	20.88	71.50	11.23
4.00	83.20	21.00	54.75	38.00	33.69	55.00	20.55	72.00	10.99
4.50	82.37	21.50	53.92	38.50	33.22	55.50	20.23	72.50	10.74
5.00	81.53	22.00	53.10	39.00	32.26	56.00	19.91	73.00	10.50
5.50	80.69	22.50	52.30	39.50	32.62	56.50	19.60	73.50	10.25
6.00	79.86	23.00	51.52	40.00	31.86	57.00	19.28	74.00	10.01
6.50	79.02	23.50	50.77	40.50	31.43	57.50	18.97	74.50	9.77
7.00	78.19	24.00	50.00	41.00	30.99	58.00	18.67	75.00	9.54
7.50	77.35	24.50	49.28	41.50	30.56	58.50	18.36	75.50	9.30
8.00	76.51	25.00	48.56	42.00	30.13	59.00	18.08	76.00	9.07
8.50	75.68	25.50	47.86	42.50	29.71	59.50	17.76	76.50	8.85
9.00	74.84	26.00	47.17	43.00	29.30	60.00	17.46	77.00	8.60
9.50	74.10	26.50	46.62	43.50	28.89	60.50	17.17	77.50	8.37
10.00	73.17	27.00	45.83	44.00	28.48	61.00	16.88	78.00	8.14
10.50	72.33	27.50	45.17	44.50	28.09	61.50	15.59	78.50	7.92
11.00	71.50	28.00	44.53	45.00	27.68	62.00	16.30	79.00	7.69
11.50	70.66	28.50	43.61	45.50	27.29	62.50	16.01	79.50	7.47
12.00	69.83	29.00	43.29	46.00	26.90	63.00	15.73	80.00	7.24
12.50	68.99	29.50	42.68	46.50	26.52	63.50	15.45	80.50	7.02
13.00	68.15	30.00	42.08	47.00	26.12	64.00	15.17	81.00	6.50
13.50	67.32	30.50	41.50	47.50	25.76	64.50	14.83	81.50	6.38
14.00	66.48	31.00	40.92	48.00	25.39	65.00	14.62	82.00	6.27

14.50	65.64	31.50	40.35	48.50	25.02	65.50	14.35	82.50	6.15
15.00	64.81	32.00	39.79	49.00	24.66	66.00	14.08	83.00	5.94
15.50	63.97	32.50	39.24	49.50	24.30	66.50	13.81	83.50	5.72
16.00	63.14	33.00	38.70	50.00	23.94	67.00	13.54	84.00	5.51
16.50	62.30	33.50	38.16	50.50	23.59	67.50	13.28	84.50	5.30

... continuación del anexo 2

% T	ppm	% T	ppm	% T	ppm	% T	ppm	% T	ppm
85.00	5.09	88.50	3.66	92.00	2.28	95.50	0.95	99.00	0.10
85.50	4.88	89.00	3.46	92.50	2.09	96.00	0.77	99.50	0.09
86.00	4.68	89.50	3.26	93.00	1.90	96.50	0.67		
86.50	4.47	90.00	3.06	93.50	1.71	97.00	0.58		
87.00	4.27	90.50	2.86	94.00	1.62	97.50	0.49		
87.50	4.06	91.00	2.57	94.50	1.33	98.00	0.39		
88.00	3.86	91.50	2.47	95.00	1.14	98.50	0.29		

Anexo 3. Parámetros para interpretación de resultados de análisis de suelos obtenidos con el método de extracción de Doble Ácido Diluido (0.05N HCl, 0.025N H₂SO₄).

ELEMENTO	DECISIÓN			
	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Fósforo (ppm)	0 – 10	10 – 15	15 – 30	> 30
Potasio (Meq/100g)	0.1 – 0.3	0.3 – 0.4	0.4 – 1.1	> 1.1

Fuente: ANACAFE, ICTA, FAUSAC.

Anexo 4. Lugares de la Costa Sur y cultivos, dónde fueron tomadas muestras de suelos.

Código	Lugar	Cultivo	
		Nombre Común	Nombre Técnico
COA 02	San José	Caña de azúcar	(<i>Saccharum officinarum</i> L.)
COA 04	San José	Cocotero y Banano	(<i>cocos nucifera</i> L.) y (<i>Musa x paradisiaca</i> L.)
COA 05	San José	Pasto	
COA 06	San José	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
COA 07	San José	Banano	(<i>Musa x paradisiaca</i> L.)
COA 08	San José	Maicillo	(<i>Sorgum bicolor</i>)
COA 09	San José	Banano	(<i>Musa x paradisiaca</i> L.)
COA 10	San José	Plátano y Sandía	(<i>Musa x paradisiaca</i> L.)
COA 11	San José	Limón persa	(<i>Citrus limon</i> L.)
COA 12	San José	Caña de azúcar	(<i>Saccharum officinarum</i> L.)
COA 13	San José	Caña de azúcar	(<i>Saccharum officinarum</i> L.)
COA 14	Iztapa	Caña de azúcar	(<i>Saccharum officinarum</i> L.)
COA 15	Iztapa	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
COA 16	Iztapa	Caña de azúcar	(<i>Saccharum officinarum</i> L.)
COA 17	Iztapa	Caña de azúcar	(<i>Saccharum officinarum</i> L.)
COA 18	Iztapa	Caña de azúcar	(<i>Saccharum officinarum</i> L.)
COA 19	Monte Rico	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
COA 20	Taxisco	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)

Estos según la génesis del suelo están incluidos en las siguientes unidades:

VIII Suelos desarrollados sobre cenizas volcánicas a elevaciones altas.

IX Suelos desarrollados sobre material fluvio-volcánico reciente a elevaciones medianas.

X Suelos desarrollados sobre material fluvio-volcánico reciente a elevaciones bajas.

Anexo 5. Lugares de Cobán y cultivos, dónde fueron tomadas muestras de suelos.

Código	Lugar	Cultivo	
		Nombre Común	Nombre Técnico
COB 01	CUNOR	Pacaya y Pino	(<i>Pinus spp.</i>)
COB 02	CUNOR	Naranja	(<i>Citrus aurantium L.</i>)
COB 03	Cobán	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
COB 04	Cobán	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
COB 05	Cobán	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
COB 06	Cobán	Cardamomo	(<i>Elettaria cardamomum</i>)
COB 07	Chilatz	Banano	(<i>Musa x paradisiaca L.</i>)
COB 08	Chilatz	Cardamomo	
COB 10	Chiquoyo	Café	(<i>Coffea arabica L.</i>)
COB 11	Chiquoyo	Café y Maíz	(<i>Coffea arabica L.</i>) y (<i>Zea mays L.</i>)
COB 12	Chiquoyo	Café y Leña	(<i>coffe arabica L.</i>)
COB 13	Chiquoyo	Cardamomo	
COB 14	Chiquoyo	Banano	(<i>Musa x paradisiaca L.</i>)
COB 15	Sechá Tolores	Cardamomo	
COB 16	Sechá Tolores	Maíz y Banano	(<i>Zea mays L.</i>)
COB 17	Santa Cruz	Huerto Familiar	
COB 18	Santa Cruz	Pino	(<i>Pinus spp.</i>)
COB 19	Santa Cruz	Tomate	(<i>Lycopersicum esculentum L.</i>)
COB 20	Santa Cruz	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)

Estos según la génesis del suelo están incluidos en las siguientes unidades:

- I Suelos desarrollados sobre rocas calcáreas a elevaciones bajas.
- III Suelos desarrollados sobre serpentina y rocas asociadas a elevaciones medianas.
- IV Suelos desarrollados sobre rocas calcáreas a elevaciones medianas.

Anexo 6. Lugares del Lago de Izabal y cultivos, dónde fueron tomadas muestras de suelos.

Código	Lugar	Cultivo	
		Nombre Común	Nombre Técnico
LAG 01	Quiriguá	Banano	(<i>Musa x paradisiaca</i> L.)
LAG 02	Quiriguá	Banano	(<i>Musa x paradisiaca</i> L.)
LAG 03	Las viñas	Pasto Napier	(<i>Pennisetum purpureum</i> S.)
LAG 04	Quiriguá	Banano	(<i>Musa x paradisiaca</i> L.)
LAG 05	Quiriguá	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
LAG 06	ICTA	Arroz experimental	(<i>Oryza sativa</i> L.)
LAG 07	Bendición	Arroz	(<i>Oryza sativa</i> L.)
LAG 08	Los Andes	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
LAG 09	Los Andes	Maíz y Yuca	(<i>Zea mays</i> L.) y (<i>Manihot esculenta</i> C.)
LAG 10	Los Andes	Arroz	(<i>Oryza sativa</i> L.)
LAG 11	Los Andes	Yuca	(<i>Manihot esculenta</i> C.)
LAG 12	Morales	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
LAG 13	Morales	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
LAG 14	Morales	Banano	(<i>Musa x paradisiaca</i> L.)
LAG 15	Morales	Chile	(<i>Capsicum</i> sp)
LAG 16	Guapinol	Frijol y Benrenjena	(<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) y (<i>Solanum melongena</i>)
LAG 17	Mariscos	Hule	(<i>Hevea brasiliensis</i> M.)
LAG 18	Izabal	Hule	(<i>Hevea brasiliensis</i> M.)
LAG 19	Izabal	Hule	(<i>Hevea brasiliensis</i> M.)
LAG 20	Izabal	Hule	(<i>Hevea brasiliensis</i> M.)

Estos según la génesis del suelo están incluidos en las siguientes unidades:

- I** Suelos desarrollados sobre rocas calcáreas a elevaciones bajas.
- II** Suelos desarrollados sobre depósitos marinos a elevaciones bajas.
- III** Suelos desarrollados sobre serpentina y rocas asociadas a elevaciones medianas.
- VI** Suelos desarrollados sobre esquistos a elevaciones medianas.
- VII** Suelos desarrollados sobre cenizas volcánicas a elevaciones medianas.

Anexo 7. Lugares del Petén, alrededor de Chisec y cultivos, dónde fueron tomadas muestras de suelos.

Código	Lugar	Cultivo	
		Nombre Común	Nombre Técnico
PET 01	Candelaria	Café y Banano	(<i>Coffea arabica</i> L.) y (<i>Musa x paradisiaca</i> L.)
PET 02	Candelaria	Maíz y Frijol	(<i>Zea mays</i> L.) y (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)
PET 03	Chisec	Maíz y Frijol	(<i>Zea mays</i> L.) y (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)
PET 04	Chisec	Huerto Familiar	
PET 05	Tucán	Pasto	
PET 06	Tucán	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
PET 07	Tucán	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
PET 08	Tucán	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
PET 09	El Cruce	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
PET 10	El Cruce	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
PET 11	El Cruce	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
PET 12	Secacao	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
PET 13	Secacao	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
PET 14	Chisec	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
PET 15	Chisec	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
PET 16	Chisec	Huerto Familiar	

Estos según la génesis del suelo están incluidos en la siguiente unidad:

- I Suelos desarrollados sobre rocas calcáreas a elevaciones bajas.

Anexo 8. Lugares de la región de los volcanes, parte oeste y cultivos, dónde fueron tomadas muestras de suelos.

Código	Lugar	Cultivo	
		Nombre Común	Nombre Técnico
VOL 01	San Antonio	Frijol	
VOL 02	San Antonio	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
VOL 03	Santa Catarina	Frijol	
VOL 04	Santa Carina	Cilantro	
VOL 05	Santa Carina	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
VOL 06	San Antonio	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
VOL 07	Ciudad Vieja	Frijol	(<i>Zea mays L.</i>)
VOL 08	Ciudad Vieja	Café	
VOL 10	Jocotenango	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
VOL 11	Los Encuentros	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
VOL 12	Los Encuentros	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
VOL 13	Los Encuentros	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
VOL 14	Los Encuentros	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
VOL 15	Los Encuentros	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
VOL 16	Lago de Atitlán, Santiago	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
VOL 17	Lago de Atitlán, Santiago	Tomate	(<i>Lycopersicum esculentum L.</i>)
VOL 18			
VOL 19			
VOL 20			

Estos según la génesis del suelo están incluidos en las siguientes unidades:

VIII Suelos desarrollados sobre cenizas volcánicas a elevaciones altas.

XI Suelos alpinos.

Anexo 9. Lugares del municipio de San Juan Ermita, departamento de Chiquimula dónde fueron tomadas muestras de suelos.

Código	Lugar
	SALITRÓN
MI100601	Potrero Espinal (lado sur de la calle)
MI120612	El Plan de las Mirandas (Lado sur-este)
MI120614	El Plan de las Mirandas II (Lado norte medio este)
MI120615	El Plan de las Mirandas II (Lado norte medio oeste)
MI130619	El Plan de las Mirandas II (Lado sur bajo)
	CHANCÓ
MI180626	Potrero Espinal o Bordo de Limón (Lado oeste de la otra colina)
MI180629	Potrero Ujushte (parte alta y oeste)
MI180630	Potrero Ujushte (parte alta y este)
MI180631	
	CORRAL DE PIEDRA
MI180635	Chagüatillo (Lado oeste, parte baja)
MI190637	Potrero Espinal (Lado nor-este de la colina, parte alta)
MI190639	Potrero Espinal (Lado nor-este de la colina, parte baja)
MI200651	Zarzal (La cumbre, parte oeste)
MI200652	Zarzal (La cumbre, parte baja)
MI200653	La Posa del Tontolo
MI200656	Corral de Piedras
MI200660	La Loma (Lado nor-este)

Estos según la génesis del suelo están incluidos en la siguiente unidad:

VII Suelos desarrollados sobre cenizas volcánicas a elevaciones medianas.

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DE ORIENTE
LICENCIATURA EN AGRONOMIA**

**CORRELACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE SUELOS
DE DOBLE ÁCIDO DILUIDO Y EL PROCEDIMIENTO SIMPLIFICADO “BYU”,
PARA LA DETERMINACIÓN DE FÓSFORO Y POTASIO, EN SUELOS DE
GUATEMALA, 2004.**

TESIS

Presentada al Honorable Consejo Regional

Por

GADID MARIANO ARMANDO ARTEAGA MATÍAS

En el acto de Investidura como

Licenciado en Agronomía

CHIQUMULA, GUATEMALA, ENERO DE 2006.

ÍNDICE

CONTENIDO	Página
I. INTRODUCCIÓN	01
II. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	03
III. JUSTIFICACIÓN	04
IV. OBJETIVOS	05
V. HIPOTESIS	06
VI. MARCO TEÓRICO	07
6.1 Marco conceptual	07
6.1.1 Fósforo en el suelo	07
6.1.2 Potasio en el suelo	08
6.1.3 Evaluación de la fertilidad de los suelos	10
6.1.4 Análisis de los suelos	11
6.1.5 Metodologías de análisis de suelos usadas en Guatemala	19
6.1.6 Expresión de los resultados de análisis de suelos	24
6.1.7 Correlación de metodologías de análisis de suelos	25
6.2 Marco referencial	
6.2.1 Procedencia de las muestras de suelos a analizar	26
6.2.2 Investigaciones realizadas sobre metodologías de análisis de suelos	27
VII. METODOLOGÍA	
7.1 Determinación de índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio	29
7.1.1 Metodología de Doble Ácido Diluido	29
7.1.2 Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young	30
7.2 Correlación de las metodologías de análisis de suelos	34
7.3 Comparación de los tiempos, procesos y costos variables	

de las metodologías para determinar Fósforo y Potasio	35
VIII. RESULTADOS	
8.1 Determinación de índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio	36
8.1.1 Índices de disponibilidad de Fósforo	36
8.1.2 Índices de disponibilidad de Potasio	37
8.2 Análisis de correlación de las metodologías del Doble Ácido Diluido y el Procedimiento simplificado BYU	37
8.2.1 Análisis de correlación para Fósforo	37
8.2.2 Análisis de correlación para Potasio	39
8.3 Comparación de tiempos, procesos y costos variables de las metodologías para determinar Fósforo y Potasio	42
8.3.1 Comparación de tiempos y procesos de las metodologías para determinar Fósforo y Potasio	42
8.3.2 Comparación de costos variables de las metodologías para determinar Fósforo y Potasio	44
IX. CONCLUSIONES	47
X. RECOMENDACIONES	48
XI. BIBLIOGRAFÍA	49
XII. ANEXOS	51

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO No.	Página
1. Lugares de muestreo y número de muestras	26
2. Regla de decisión del Coeficiente de Correlación	34
3. Correlaciones para Fósforo entre las metodologías de análisis de suelos de Doble Ácido Diluido y el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young	38
4. Correlaciones para Potasio entre las metodologías de análisis de suelos de Doble Ácido Diluido y el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young	40
5. Cuadro resumen del diagrama de flujo de proceso para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo con la metodología de Doble Ácido Diluido	42
6. Cuadro resumen del diagrama de flujo de proceso para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo con el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young	43
7. Cuadro resumen del diagrama de flujo de proceso para la determinación de los índices de disponibilidad de Potasio con la metodología de Doble Ácido Diluido	43
8. Cuadro resumen del diagrama de flujo de proceso para la determinación de los índices de disponibilidad de Potasio con el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young	44
9. Costo variable para la determinar Fósforo y Potasio en 1 muestra de suelo con la metodología de Doble Ácido Diluido	45
10. Costo variable para la determinar Fósforo y Potasio en 1 muestra de suelo con el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young	45

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA No.	Página
1. Espectrofotómetro (Spectronic 20)	20
2. Espectrofotómetro de Absorción Atómica	21
3. Percoladora de café expreso usada para obtener el extracto del suelo	23
4. Índices de disponibilidad de Fósforo obtenidos con el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young y la metodología de Doble Ácido Diluido	36
5. Índices de disponibilidad de Potasio obtenidos con el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young y la metodología de Doble Ácido Diluido	37
6. Índices de disponibilidad de Fósforo de 0-10 ppm (Bajo)	39
7. Índices de disponibilidad de Fósforo de 10-15 ppm (Medio)	39
8. Índices de disponibilidad de Fósforo de 15-30 ppm (Alto)	39
9. Índices de disponibilidad de Fósforo > 30 ppm (Muy alto)	39
10. Índices de disponibilidad de Potasio de 0.1-0.3 meq/100 gr de suelo (Bajo)	41
11. Índices de disponibilidad de Potasio de 0.3-0.4 meq/100 gr de suelo (Medio)	41
12. Índices de disponibilidad de Potasio de 0.4-1.1 meq/100 gr de suelo (Alto)	41
13. Índices de disponibilidad de Potasio > 1.1 meq/100 gr de suelo (Muy alto)	41

I. INTRODUCCIÓN

El análisis de suelos es una herramienta útil para la agricultura, al permitir que la producción agrícola sea más efectiva, mediante la fertilización basada en la disponibilidad aparente del suelo y la necesidad de la planta, para proveerle nutrimentos. Esto lógicamente se ve reflejado en un aumento de la rentabilidad y una disminución del impacto ambiental que conlleva el uso de fertilizantes.

Se han desarrollado en las últimas décadas, diferentes métodos para la extracción del fósforo disponible en los suelos, en la búsqueda por un método con el cual se pueda pronosticar la posible respuesta de la planta bajo una extensa variedad de condiciones de suelo, y que además sea conveniente para usarse en pruebas de rutina de suelo. Dicha búsqueda hasta aquí no ha sido exitosa.

La Universidad de Brigham Young de E.E.U.U. ha desarrollado un procedimiento de análisis de suelos para ser usado en países en vías de desarrollo. Los autores consideran que este procedimiento además de ser simple es eficiente e implica menos costos que la metodología de Doble Ácido Diluido, la cual es usada en el laboratorio de análisis de suelos del Centro Universitario de Oriente y otros laboratorios del país.

Este procedimiento propone la extracción de los elementos nitrógeno (Nitrato-nitrógeno), fósforo (P) y potasio (K) de la muestra de suelo a través de agua caliente presurizada, utilizando una percoladora de café expreso. Los índices de disponibilidad de los nutrientes son cuantificados con técnicas colorimétricas utilizando el espectrofotómetro (Spectronic 20).

La Universidad de Brigham Young, pretende implementar en Guatemala el procedimiento simplificado de análisis de suelos, pero previo a su implementación y adopción es necesario determinar que tanto se correlacionan los resultados obtenidos con el procedimiento simplificado comparados con los obtenidos con la

metodología de Doble Ácido Diluido, la cual ya ha sido evaluada, y así, poder inferir que tan aceptable es la nueva alternativa, no solo en precisión sino también en cuanto al tiempo necesario para los análisis.

En la presente investigación se determinaron los índices de disponibilidad de fósforo y potasio de 115 muestras de suelos del país haciendo uso de las dos metodologías de análisis de suelos. Luego se realizó el análisis de correlación correspondiente a los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio, para determinar el grado de asociación existente entre las dos metodologías. Además se hicieron diagramas de flujo para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio de ambas metodologías con el objeto de comparar el tiempo invertido y establecer cual es más rápida y requiere menos operaciones. Por último, se estimó los costos variables para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio de cada metodología con la finalidad de demostrar cuál tiene menor costo.

La investigación se llevó a cabo en el laboratorio de suelos del Centro Universitario de Oriente, ubicado en la Finca el Zapotillo, ciudad de Chiquimula, departamento de Chiquimula y simultáneamente en la Universidad de Brigham Young de E.E.U.U.

II. DEFINICION DEL PROBLEMA

En los laboratorios de análisis de suelos de Guatemala, especialmente el del Centro Universitario de Oriente, lo más común es usar la metodología de Doble Ácido Diluido para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio. La Universidad de Brigham Young en la búsqueda de una nueva alternativa de análisis de suelos que permita determinar éstos índices de disponibilidad, ha desarrollado un procedimiento simplificado el cual sustenta ser más rápido, más barato y muy similar en resultados en relación a la Metodología de Doble Ácido. Sin embargo, es necesario demostrar si los valores extraídos son o no similares a los valores extraídos con la metodología de Doble Ácido Diluido, la cual ya ha sido evaluada junto con otras metodologías convencionales de análisis de suelos en algunos suelos del país.

III. JUSTIFICACIÓN

El laboratorio de análisis de suelos del Centro Universitario de Oriente al igual que otros laboratorios de análisis de suelos de Guatemala utiliza la metodología de Doble Ácido Diluido para realizar dichos análisis.

Las mejores pruebas de disponibilidad de nutrimentos en los suelos son aquellas que reflejan una relación estrecha entre la cantidad de nutriente en el suelo y los rendimientos de los cultivos y son, además, insensibles a las propiedades del suelo.

Hasta el momento se pueden considerar como los mejores métodos de extracción para Fósforo el del agua y el del anión resina intercambiable, al simular estrechamente la tendencia actual del Fósforo en la solución del suelo, estos métodos no son muy usados en pruebas de rutina del suelo porque dificultan el análisis. Además en el caso del método del agua la cantidad extraída de Fósforo es también baja, especialmente en suelos tropicales con alta capacidad de sorción de Fósforo. El procedimiento simplificado BYU al hacer la extracción de los elementos Nitrógeno (Nitrato-nitrógeno), Fósforo (P) y Potasio (K) del suelo a través de agua caliente presurizada, pretende superar dichas limitaciones, y las de Doble Ácido Diluido, por lo consiguiente es necesario conocer el grado de similitud del procedimiento BYU comparado con la metodología de Doble Ácido Diluido.

IV. OBJETIVOS

4.1 GENERAL

Generar información que contribuya a validar una nueva metodología de análisis de suelos para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio en suelos de Guatemala.

4.2 ESPECÍFICOS

- 4.2.1 Determinar los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio en suelos de Guatemala utilizando las metodologías de análisis de suelos de Doble Ácido Diluido y la simplificada de la Universidad de Brigham Young.
- 4.2.2 Determinar el grado de correlación entre las dos metodologías de análisis de suelos.
- 4.2.3 Realizar una comparación de los tiempos, procesos y costos variables invertidos en la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio de las metodologías de análisis de suelos.

V. HIPÓTESIS

La metodología de Doble Ácido Diluido y el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young, presentan un alto grado de correlación entre los valores de los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio en los diferentes suelos del país.

VI. MARCO TEÓRICO

6.1 MARCO CONCEPTUAL

6.1.1 FÓSFORO EN EL SUELO

El Fósforo (P) en el suelo se encuentra formando parte de agrupaciones orgánicas e inorgánicas. Dependiendo del tipo de suelo, se puede decir que entre 60-50% corresponde a la fracción orgánica, mientras que el resto se encuentra en forma inorgánica. Las formas orgánicas se hallan en el humus del suelo, en diferentes niveles de estabilización. Dentro de la compleja configuración del humus, podemos distinguir sustancias orgánicas más accesibles para las plantas (lábil) y otras de menor accesibilidad (no lábil) (5).

El motor que mueve todas las formas orgánicas y que realizan la mineralización del P orgánico, es la actividad microbiana (5).

El P inorgánico está representado por diferentes fracciones o pooles (5):

- P presente en los minerales primarios (básicamente apatitas).
- P adsorbido (lábil) en las arcillas.
- P en solución: es el que pueden aprovechar las plantas: HPO_4^- y H_2PO_4^- .
- P no lábil (poco disponible) representado por P precipitado/Ocluido.

A medida que el P disponible en la solución del suelo es absorbido por las plantas, es repuesto a partir de la mineralización del humus, de las fracciones más lábil de las arcillas y en forma mucho más lenta, desde la mineralogía primaria. Este reaprovisionamiento de P hacia la solución del suelo, se realiza mediante un equilibrio químico dinámico (5).

Las plantas absorben la mayoría del fósforo como el ión ortofosfato primario (H_2PO_4^-). Aunque también absorben pequeñas cantidades de fósforo

como ión ortofosfato secundario (H_2PO_4^-). El pH del suelo influye en gran parte en la absorción de estas dos formas de fósforo por la planta (8).

El fósforo soluble en el suelo, sin importar que éste provenga de la apatita, fertilizante, estiércol o materia orgánica, forma compuestos con el calcio, hierro, aluminio y manganeso o se enlaza con la superficie reactiva de ciertos minerales arcillosos como la caolinita, los óxidos de aluminio y hierro en suelos tropicales rojos y la alófana, imogolita y complejos de humus-aluminio en los suelos derivados de ceniza volcánica. Estas reacciones reducen la disponibilidad de fósforo para las plantas. Sin embargo, compuestos como el fosfato dicálcico y el fosfato octacálcico son relativamente disponibles para las plantas (8).

El fósforo se mueve muy poco en la mayoría de los suelos. Generalmente se mantiene en el lugar donde ha sido colocado por la meteorización de los minerales o por la fertilización. Casi todo el fósforo se mueve en el suelo por difusión, proceso lento y de poco alcance que depende de la humedad del suelo (8).

Existe una dependencia muy estrecha entre el pH del suelo y la presencia de formas asimilables y formas bloqueadas de fósforo para nutrición vegetal. En los suelos de pH ácido el fósforo asimilable suele presentarse en forma de fosfatos de hierro y aluminio; en los con pH neutro, en cambio, procede de fosfatos de calcio solubles; pero con un pH superior a 7.5 aumentan las formas insolubles del fósforo, que no son asimilables por las plantas. Por todo ello, es imprescindible conocer previamente el pH del suelo y, en función de éste, elegir el procedimiento más adecuado (4).

6.1.2 POTASIO EN EL SUELO

El contenido de K en la litosfera es del orden del 1.58%, pero existen variaciones según la clase de rocas presentes. En los suelos, el contenido

de K está estrechamente relacionado con el tipo de material parental y la pedogénesis (Mengel y Rahmatullah, 1994) (2).

Varias investigaciones confirmaron que el sistema agrícola no tiene otra vía de ingreso natural para el balance de K que la reposición primaria proveniente de la liberación de los minerales primarios y secundarios, siendo preponderante la participación de la fracción arcilla. Los minerales arcillosos son la fuente principal de K en el suelo (Sardi y Debreczeni, 1992; Buhman, 1993) (2).

Los análisis químicos muestran que el contenido de K total del suelo no es un índice de fertilidad para los cultivos y que los suelos contienen K en diferentes formas. Una parte extraíble por reactivos muy suaves, tales como el agua o soluciones salinas diluidas; otra parte puede extraerse solamente con reactivos fuertes tales como ácido nítrico hirviente. Numerosas investigaciones demostraron que estas formas extremas difieren en la facilidad con las que las plantas pueden extraerlas (2).

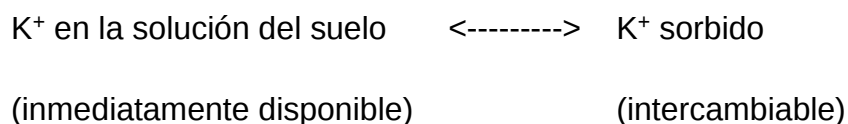
El potasio es absorbido del suelo por las plantas en forma iónica (K^+). A diferencia del nitrógeno y el fósforo, el potasio no forma compuestos orgánicos en la planta (8).

El potasio está presente en el suelo en tres formas: en solución, intercambiable y no intercambiable (4).

El K de la solución de suelo está inmediatamente disponible y puede ser absorbido por las plantas en forma inmediata, pero las cantidades presentes son muy pequeñas, apenas una mínima porción del K total del suelo se encuentra en esta forma. Las plantas en crecimiento rápidamente extraen el K de la solución del suelo, pero a medida que el K es absorbido y extraído, su concentración es renovada y restituida inmediatamente por la cesión de formas menos fácilmente accesibles ubicadas en las zonas de

adsorción de los coloides minerales y orgánicos del suelo. El proceso de adsorción-desorción es el que repone y equilibra la concentración de K de la solución del suelo (2).

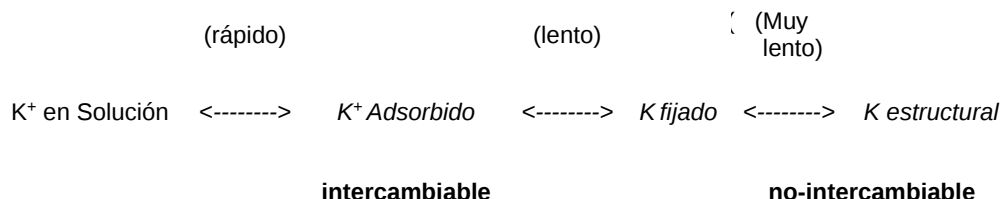
El Potasio intercambiable, es la forma iónica del potasio (K^+) unido electrostáticamente a los materiales que componen la fase sólida coloidal mineral y orgánica. A medida que la concentración del K de la solución desciende, el K adsorbido es liberado a la solución del suelo. A la inversa, si la concentración de K de la solución del suelo aumenta por la aplicación de fertilizantes potásicos, parte de éste dejará la solución y se unirá electrostáticamente al material coloidal de la fase sólida. El proceso de equilibrio es instantáneo (2):



El K de la solución más el intercambiable, es comúnmente denominado K "disponible" y medido en los análisis convencionales para evaluar la fertilidad del suelo (2).

Existen formas de K que están fuertemente unidas a la fase sólida mineral, las cuales se denominan: "K fijado" y "K estructural". Ambas constituyen el K de reserva o de reposición de los suelos. El K fijado es el que se ubica en el espacio hexagonal de las láminas de silicio y el K estructural que es el que está químicamente combinado con los elementos en la estructura de los minerales del suelo. Ambas formas son denominadas no-intercambiables (2).

Se produce un equilibrio entre el K intercambiable y estas formas no-intercambiables. El proceso para alcanzar el estado de equilibrio es mucho más lento que el de K de la solución del suelo-K intercambiable (2).



6.1.3 EVALUACIÓN DE LA FERTILIDAD DE LOS SUELOS

Esta evaluación es el proceso mediante el cual se diagnostican los problemas de disponibilidad de nutrimentos y se recomiendan programas de fertilización al suelo y foliares, con los cuales es posible alcanzar los objetivos de la nutrición vegetal (6).

Existen varios procedimientos para hacer la evaluación mencionada y entre ellos el más difundido es el análisis de suelo y el análisis de tejido foliar; seguidos por pruebas de invernadero con la técnica del elemento faltante, ensayos de fertilizantes simples y combinaciones de ellos (6).

Cualquiera de los procesos citados que se utilice, será exacto en su predicción o diagnóstico, en función de la exactitud con que se recolecte la muestra de suelo y/o foliar, para someterla al respectivo análisis (6).

6.1.4 ANÁLISIS DE SUELOS

El análisis de suelos, constituye unas de las técnicas más utilizadas para la recomendación de fertilizantes. Mediante el análisis de muestras representativas de suelos en las que se determina la concentración total de uno o más elementos, o la concentración de nutrimentos solubles o asimilables (10).

En los análisis se utilizan ácidos débiles y otras sustancias como soluciones extractoras, las cuales no remueven necesariamente la misma cantidad de nutrimentos que un cultivo dado. Extraen cierta fracción que puede o no estar correlacionada con la respuesta de la planta a la aplicación de

fertilizantes. Cuando esta correlación se ha realizado en un cultivo dado, en condiciones de suelo establecidas, los análisis de suelos son de gran utilidad, de lo contrario solo tienen un valor relativo (10).

De acuerdo a la solución extractora usada entre los métodos de análisis de suelos tenemos los siguientes:

❖ **Métodos para determinar los índices de disponibilidad de potasio.**

La selección del método para la determinación de los índices de disponibilidad de potasio debe estar basada en la naturaleza de los suelos a ser examinados y la instrumentación disponible (1).

Método de acetato de amonio 1.0N neutro (NH_4Ac)

Puesto que la cantidad de potasio intercambiable del suelo depende de la naturaleza de la solución para reemplazarlo, el potasio intercambiable es definido más específicamente como aquel el cual es extraído con Acetato de Amonio 1.N neutro menos el potasio soluble en agua (1).

Para la extracción se utilizan 10 gramos de suelo preparado para el análisis (5 gramos si el suelo contiene más de 500 ppm de potasio extractable) y 25 centímetros cúbicos de solución de Acetato de Amonio (15).

El uso de este método es necesario en suelos calcáreos con alta capacidad de intercambio. Este método requiere más capacidad de reemplazo que la permitida por el método del ácido débil (1).

Hay que tener en cuenta que, debido a la afinidad entre el K^+ y el NH_4^+ , solamente se desplaza el K^+ de las posiciones de fácil intercambio (14).

Método del ácido sulfúrico frío

Este método ha sido usado para determinar la disponibilidad de potasio en suelos ácidos y neutros. En general, el uso de este método es aceptable en muchos suelos que tienen un CEC < 10 meq/100 g y que son relativamente bajos en materia orgánica (< 5%) (1).

Método del potasio soluble en agua

En suelos no salinos la cantidad de potasio soluble es tan pequeña que no es apreciable el error hecho al incluirlo junto con el potasio intercambiable. Sin embargo, en suelos salinos el potasio soluble debe ser determinado por un extracto saturado o un extracto similar y restado del potasio encontrado con Acetato de Amonio. La eliminación del potasio soluble en agua del extraído antes con Acetato de Amonio no es recomendable, porque cuando el contenido de sal de la solución del suelo decrece, la adsorción de cationes divalentes en solución aumenta (1).

❖ Métodos para determinar los índices de disponibilidad de fósforo

Los métodos para la determinación de fósforo en el suelo, sus varias formas y disponibilidad para las plantas, han sido esenciales para el desarrollo de principios y conocimiento de la naturaleza y conducta del fósforo en los suelos.

Existen muchos métodos, y ellos varían en principio y detalle técnico. La selección del método conveniente demanda una clara afirmación de los objetivos que requiere la medición de fósforo en el suelo. Otras consideraciones incluyen las propiedades del suelo, condición de la muestra o ambiente, exactitud y reproducibilidad, y los medios, equipo y personal disponible (1).

La mayoría métodos de determinación de fósforo en el suelo tienen dos fases distintas-primera, la preparación de la solución de suelo conteniendo el fósforo o fracción de ése, y segunda, la determinación cuantitativa del fósforo en esta solución. La opción del método colorimétrico para la determinación de fósforo depende de la concentración de fósforo en la solución, la concentración de sustancias interfiriendo en la solución a ser analizada, y el sistema ácido particular involucrado en el procedimiento analítico (1).

Los métodos de Molibdeno azul son los más sensibles y, como resultado, son ampliamente usados para extractos de suelos conteniendo pequeñas cantidades de fósforo así como para fósforo total de los suelos. Éstos métodos están basados en el principio que en una solución ácida de Molibdato conteniendo iones Ortofosfato, se forma un complejo de Fosfomolibdato que puede ser reducido por Ácido Ascórbico, Cloruro de Estaño, y otros agentes reductores a un Molibdeno color azul. La intensidad del color azul varía con la concentración de fósforo pero es afectada también por otros factores tales como acidez, arseniatos, silicatos, y otras sustancias las condiciones de oxidación-reducción del sistema. Jackson (1958) ha discutido detalles adicionales de estos métodos. Una amplia variedad de adaptaciones dentro de este principio básico han sido necesarias para aplicar este método general a las condiciones encontradas en la práctica (1).

Método del fósforo soluble en agua

El agua fue probablemente el primer extractante que los investigadores aplicaron para la medición de P en los suelos (12).

El método de Spurway hace la extracción con agua destilada en relación de 1 centímetro cúbico de suelo por 6.5 centímetros cúbicos de

extractante. Fue utilizado durante mucho tiempo en España para la determinación del fósforo fijado pero fácilmente movilizable, denominada como fósforo en reserva. En los casos en que la desorción y solubilización es favorecida (suelos ácidos) o bien dificultada (suelos básicos) la respuesta varía mucho con las previsiones del método (14).

Según Olsen SR; Sommers LE. (1962), la concentración de Fósforo en solución aumenta a medida que aumenta la cantidad de suelo por unidad de volumen de agua. Un extracto a saturación se aproxima más a la concentración de Fósforo que se espera en la solución de donde las raíces absorben el Fósforo; sin embargo, tal extracto requiere más tiempo de preparación y su análisis presenta más dificultades. En algunos casos estos factores pueden no ser tan importantes y los resultados de un extracto a saturación puede ser más deseable.

Como conclusión, Olsen S.R. & Sommers L.E., argumentan que para propósitos de rutina y grandes números de muestras la extracción de Fósforo con agua se utilice una razón de suelo y agua de 1:10.

La concentración de fósforo en solución aumenta a medida que aumenta la cantidad de suelo por unidad de volumen de agua. Para propósitos de rutina y grandes números de muestras, la extracción de fósforo con agua a una razón de 1:10 es más conveniente (1).

Método del fósforo soluble en fluoruro ácido diluido

El extractante usado predominantemente en el cercano oeste de los Estados Unidos es Bray-Kurtz, designado comúnmente Bray No. 1. Este se compone de Ácido Clorhídrico (HCl 0.03N) y Fluoruro de Amonio (NH₄ F 0.025N) (12).

La extracción se hace en la proporción de 1 gramo de suelo por 7 centímetros cúbicos de solución (14).

La extracción del fósforo por este procedimiento se basa sobre el efecto de la solubilidad del H^+ en el fósforo del suelo y la capacidad del F^- de bajar la actividad del Al^{3+} y en un grado inferior del Ca^{2+} y del Fe^{2+} en el sistema de la extracción. El uso de este método se debe limitar normalmente a los suelos con valores de pH menores a 6,8 (pH suelo determinado en agua) cuando la textura de la arcilla es marga o más fina (14).

En general el método propuesto por Bray y Kurtz (1945) ha sido más exitoso en suelos ácidos. Las bajas estimaciones de fósforo disponible en suelos calcáreos han sido atribuidas a la rápida neutralización del ácido por el carbonato de calcio (Blanchar & Calwell, 1964; Randall & Grava, 1971). Algunos suelos ácidos y arenosos pueden mostrar interferencias de fluoruros, el Ácido Bórico elimina la posible interferencia en el desarrollo del color (1).

Método del fósforo soluble en bicarbonato de sodio

Olsen et al. (1954) introdujeron el bicarbonato de sodio de 0,5 M (solución de $NaHCO_3$) en un pH de 8,5 para extraer P de suelos calcáreos, alcalinos, y neutrales.

La extracción se hace en la proporción de 1 gramo de suelo por 20 centímetros cúbicos de solución (14).

Este extractante disminuye el calcio en la solución (a través de la precipitación del carbonato del calcio), y esta disminución realza la disolución de fosfatos de calcio. Por otra parte, esta solución extrae P disuelto y fijado por adsorción en superficies del carbonato y del óxido de hierro del calcio (12).

El extractante de Olsen (NaHCO_3) es absolutamente eficaz para los suelos con CCE alta, alto por ciento de saturación de bases, cantidades medias a altas de fosfatos del calcio, y debe contener carbonatos de calcio (Thomas y Peaslee, 1973). Se utiliza extensivamente en estados tales como Arizona, California, Utah, Wyoming, y Oregon. La investigación también indica que el procedimiento trabaja razonablemente bien en suelos moderadamente ácidos. Sin embargo, no muchos suelos moderadamente ácidos utilizan el procedimiento. El hecho de que no sea utilizado más extensamente en estos suelos es probablemente debido a la carencia de los datos de la correlación (12).

Este método puede proporcionar escasa precisión cuando se aplica en suelos fuertemente calizos, ya que el tiempo de extracción es muy corto (30 minutos) y está comprobado que el “umbral de extracción” no se consigue, para estos suelos hasta pasadas varias horas de aplicación (Coppenet, 1991) (14).

Método del fósforo soluble en ácido clorhídrico diluido y ácido sulfúrico

Mehlich, en 1953 introdujo una combinación de los ácidos HCl y de H_2SO_4 (Mehlich 1) para extraer P de suelos en la región norte-central de los Estados Unidos en esta solución ácida se pueden disolver los fosfatos de hierro y aluminio, y además el P fijado por adsorción en superficies coloidales de los suelos. En la década de los 80s, Mehlich modificó su prueba inicial de suelo y desarrolló un extractante con varios elementos (Mehlich 3) que es conveniente para extraer P y otros elementos en suelos ácidos y neutrales (12).

En los suelos llanos costeros de textura gruesa de Georgia, Gascho et al. (1990) encontraron que Mehlich 3 extrae cerca de 1,46 veces más P que Mehlich 1. Sin embargo, en suelos de textura más fina el extractante de Mehlich 3 extrae cerca de 1,6 veces más P que el

Mehlich 1 (comunicación personal, el Dr. Ray Tucker, Ministerio de Agricultura de Carolina del norte). La capacidad del Mehlich 3 de extraer más P de los suelos es debido a la presencia del ión F^- (como NH_4F), similar a los extractantes de P usados por Bray en el cercano oeste (12).

Método del fósforo soluble en bicarbonato de amonio

Esta Nueva prueba de suelo fue desarrollada para la extracción simultánea de fósforo, nitratos, potasio, cinc, hierro, cobre y manganeso de suelos alcalinos. La solución extracto es Bicarbonato de Amonio 1.0M (NH_4HCO_3) y Ácido Pentaacético Dietilenotriamino 0.005M (DTPA) y tiene un pH de 7.6. Este reactivo extrae sobre el medio tanto fósforo como la prueba $NaHCO_3$. Una pequeña alícuota del extracto es esencial porque grandes cantidades de Amonio pueden hacer turbia la solución (Folsom et al., 1977) (1).

Método del fósforo extractable con Anión Resina

Uno de los métodos más prometedores para estimar la disponibilidad de nutrientes es la tecnología de las resinas de intercambio. Los aniones de resina remueven el fósforo de los suelos sin alteraciones químicas o cambios del pH. Las resinas han sido utilizadas también para evaluar la eficacia de fosfatos residuales, para medir la proporción de fósforo liberado de los suelos y la capacidad buffer de los suelos. La difusión de iones es el principal mecanismo que controla la concentración de nutrientes en la superficie de las raíces, especialmente para los nutrientes inmóviles como fósforo (P) y potasio (K). De igual forma, la acumulación de iones en las resinas de intercambio depende de la concentración y la tasa de la difusión de los iones en el medio circundante. A diferencia del extracto químico de la muestra de suelo, la acumulación de iones en la resina de intercambio depende de la temperatura y el contenido de agua del suelo, factores que afectan tanto la actividad biológica como la difusión de iones. Las resinas de intercambio se entierran en el suelo y de esta forma están expuestas a

las mismas condiciones que las raíces de las plantas, por esta razón, la recuperación de nutrientes de las resinas deberían reflejar mejor la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Una ventaja de las resinas de intercambio sobre los métodos tradicionales de extracción de nutrientes es la relación mecánica entre la recuperación de nutrientes por las resinas de intercambio y la disponibilidad de nutrientes para las plantas (1).

Las resinas de intercambio pueden integrar los efectos de los procesos físicos, químicos y biológicos que afectan la mineralización de nutrientes de las formas orgánicas a inorgánicas, la transformación de unas formas minerales a otras y la difusión de nutrientes a las raíces. Además, las resinas son también útiles para determinar las diferencias en la capacidad de un suelo de suplir nutrientes a medida que éste es afectado por manejo a largo plazo como la rotación de cultivos y la historia de fertilización (1).

6.1.5 METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE SUELOS USADAS EN GUATEMALA

Obviamente hay varias opciones en cuanto a la metodología para suelos de Guatemala. De todos los elementos, talvez la medida de fósforo es la más difícil de estandarizar. La extracción de Mehlich 3 ha tenido mucha aceptación en varias partes del mundo con suelos muy distintos. Países tan distintos como Costa Rica y Canadá están utilizando Mehlich 3 como método estándar. Guatemala, aunque es un país relativamente pequeño, tiene una variación increíble en tipos de suelos (15).

Los resultados se expresan en fósforo elemental (P) o anhídrido fosfórico (P_2O_5). 1 ppm de P_2O_5 equivale a 0.4366 ppm de P (4).

Normalmente las reacciones de potasio en el suelo no son muy complicadas, ni la extracción y evaluación en el laboratorio. Para su determinación se puede usar otros cationes, como Amonio (NH_4^+) o Sodio (Na^+) (15).

Los resultados de los análisis se expresan bien en potasio (K), o bien en potasa (K_2O). 1 ppm K_2O equivale a 0.83 ppm de K (4).

- **Metodología de Doble Ácido Diluido o Carolina del Norte**

Para determinar los índices de disponibilidad de fósforo se hace uso de los siguientes reactivos y equipo, ver figura 1:

Reactivo de Extracción (0.05N HCl en 0.025N H_2SO_4)

Se prepara con 4 mililitros de Ácido Clorhídrico concentrado y 0.7 mililitro de Ácido Sulfúrico concentrado. Estos son puestos en un matraz volumétrico de 1000 mililitros, agregando agua destilada hasta aforar a 1000 mililitros (3).

Reactivo A

Se disuelve 12.0 gramos de Molibdato de Amonio en 250 mililitros de agua destilada. También se disuelve 0.2908 gramos de Tartrato de Antimonio-potasio en 100 mililitros de agua destilada. Se agrega 148 mililitros de H_2SO_4 concentrado en un matraz de 1000 mililitros y se afora con agua destilada. Finalmente se mezcla las tres soluciones en un matraz volumétrico (2000 mililitros) y agrega agua destilada hasta aforar a 2000 mililitros (3).

El reactivo “A”, consiste de Molibdato de Amonio el cual forma un compuesto con los iones de fosfato, que cuando es reducido, forma un color azul. El reactivo “A” también esta constituido por Tartrato de

Antimonio-potasio (Potassium tartrate), este acelera el desarrollo del color y hace que sea estable por más tiempo (7).

RECOMENDACIÓN:

- ❖ No debe estar expuesto a luz directa.

Reactivo B

Se disuelve 0.528 gramos de Ácido Ascórbico y 100 mililitros de reactivo A. Este reactivo debe prepararse el día que se necesita (3).

RECOMENDACIÓN:

- ❖ Esta solución debe prepararse el día que va utilizarse.

Estándar de Fósforo (1000 ppm)

Se pesan 4.394 gramos de KH_2PO_4 y vacían en un matraz volumétrico (1000 mililitros). Luego se disuelve el KH_2PO_4 y se agrega agua destilada hasta aforar a 1000 mililitros (3).



Fuente: Laboratorio de suelos del Centro Universitario de Oriente.

Figura 1. Espectrofotómetro (Spectronic 20)

El Espectrofotómetro (Spectronic 20) se usa para determinar Fósforo, mediante la medición del porcentaje de transmitancia de las muestras de suelo a 880 nanómetros.

Para determinar los índices de disponibilidad de potasio se hace uso del mismo reactivo de extracción usado en la determinación de fósforo. El estándar se prepara de la siguiente manera:

Estándar de Potasio (1000 ppm)

Se pesan 1.908 gramos de KCl, se vacían en un matraz volumétrico de 1000 mililitros y se agrega agua destilada hasta aforar a 1000 mililitros (3).

El equipo empleado se describe a continuación, ver figura 2:



Fuente: Laboratorio de suelos del Centro Universitario de Oriente.

Figura 2. Espectrofotómetro de absorción atómica.

Espectrofotometría de absorción atómica, es una técnica muy relacionada con la fotometría de llama ya que se utiliza una llama para atomizar la disolución de la muestra de modo que los elementos a analizar se encuentran en forma de vapor de átomos. Ahora bien, en absorción atómica existe una fuente independiente de luz monocromática, específica para cada elemento a analizar y que se hace pasar a través del vapor de átomos, midiéndose posteriormente la radiación absorbida (13).

La absorción atómica es una técnica que presenta menos interferencias y es más simple que la fotometría de llama, lo que explica el espectacular desarrollo de la técnica en los últimos años. Hay que señalar que a pesar de ello, la absorción atómica no ha eliminado el uso de la fotometría, sino que ambos métodos deben considerarse

complementarios, siendo la sensibilidad de cada uno de ellos superior a la del otro para determinados elementos (13).

- **Procedimiento simplificado propuesto por la Universidad de Brigham Young**

Básicamente consiste en la extracción de suelo con agua caliente presurizada. De dicha extracción se determina el contenido del nutriente cuantificado con técnicas colorimétricas o turbidimétricas (7).

Para determinar los índices de disponibilidad de fósforo se hace uso de los siguientes reactivos y equipo:

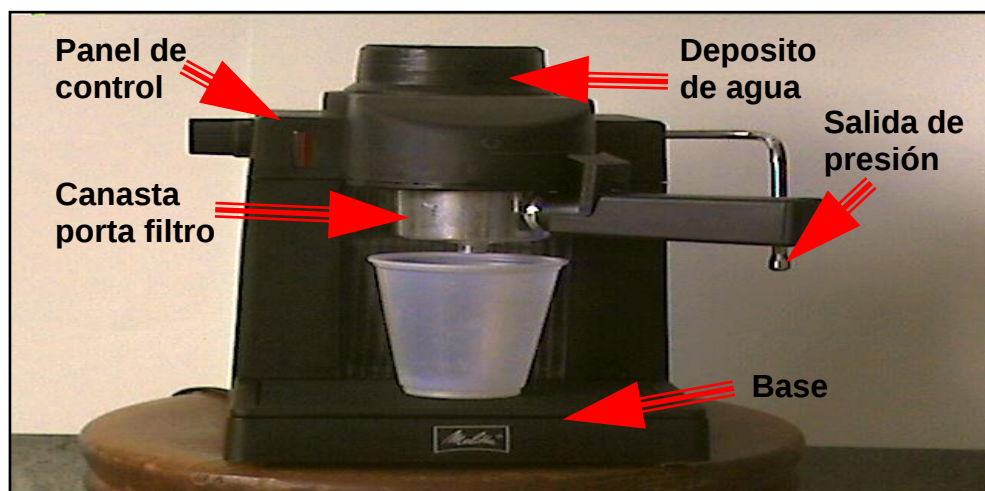
Reactivo A

Se disuelve 12.0 gramos de Molibdato de Amonio en 250 mililitros de agua destilada. También se disuelve 0.2908 gramos de Tartrato de Antimonio-potasio en 100 mililitros de agua destilada. Se agrega 148 mililitros de H_2SO_4 concentrado en un matraz de 1000 mililitros y se afora con agua destilada. Finalmente se Mezcla las tres soluciones en un matraz volumétrico (2000 mililitros) y agrega agua destilada hasta aforar a 2000 mililitros (3).

Reactivo B

Se disuelve 0.528 gramos de Ácido Ascórbico y 100 mililitros de reactivo A. Este reactivo debe prepararse el día que se necesita (8).

El procedimiento emplea los reactivos A y B al igual que la metodología Carolina del Norte, difiriendo de ésta, en que, no hace uso del reactivo de extracción, sino, la extracción se hace con la percoladora de café expreso, ver figura 3 (3).



Fuente: Laboratorio de suelos del Centro Universitario de Oriente.

Figura 3. Percoladora de café expreso usada para obtener el extracto del suelo.

El calor y presión son los responsables de que en el extracto sólo salgan los nutrientes. Se ha dicho que existe cierta relación entre la fuerza del vapor liberado y la textura del suelo, refiriéndose a que es más fuerte cuando la textura es más fina, es decir, contiene más arcilla. Al final en la canasta porta filtro de la percoladora de café expreso sólo deberá haber suelo, para asegurar que la extracción fue exitosa (7).

Además al igual que en la metodología de Doble Ácido Diluido hace uso del Spectronic 20, para medir la transmitancia de las muestras.

Para determinar los índices de disponibilidad de potasio se hace uso de los siguientes reactivos y equipo (7):

Solución ácido acético etelinediaminetetra (EDTA)

Se coloca 15 gramos de EDTA en un matraz de 1000 mililitros de volumen, agrega 88 ml de 1.0N de NaOH y afora con agua destilada a 1000 mililitros (7).

Solución formaldehído

Se diluye Formaldehído con agua destilada en una relación 1:1 (7).

Solución formaldehído y EDTA

Se mezcla EDTA y Formaldehído, usando respectivamente la relación 2:1 (7).

RECOMENDACIÓN:

- ❖ Esta solución debe prepararse el día que va ser utilizada.

Solución de goma ghatti o gum arabic

Se mezcla 5 gramos de polvo de Goma Ghatti con 500 mililitros de agua destilada. Se agita la solución antes de usar (7).

Solución sódica de borato tetrafenílico

Se disuelve 5 gramos de Borato Tetrafenílico de Sodio en 50 mililitros de agua destilada. Luego se transfiere la solución a un matraz volumétrico de 100 mililitros y agrega 10 mililitros de 01.N de NaOH. Posteriormente se afora la solución a 100 mililitros. La solución debe tomar un color ámbar (7).

RECOMENDACIONES:

- ❖ Esta solución no debe ser utilizada más allá de 1 mes a partir del día en que fue preparada.
- ❖ Debe filtrarse la solución con papel filtro No. 5 110 mm en caso de no tener un color ámbar claro. Una coloración café o sucia indica que hay potasio, el cual puede provenir de contaminación con otros químicos.

6.1.6 EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SUELOS

Las expresiones más usadas de los análisis de suelos se hacen en base a porcentaje (%), miliequivalentes por 100g de suelo (meq/100g), miliequivalentes por litro (meq/l) y partes por millón (p p m). Es muy frecuente encontrar resultados expresados en kilogramos por hectárea. Esta última forma de expresión se relaciona con el peso de una hectárea a una profundidad determinada, y ésta a su vez depende de la densidad (10).

❖ **Porcentaje**

Son las partes de un constituyente en 100 partes del material analizado. Es común su uso en las siguientes determinaciones: carbón orgánico, materia orgánica, nitrógeno total, carbonato de calcio, saturación de bases, sodio intercambiable y constantes de humedad (10).

❖ **Partes por millón**

Es el número de partes en un millón de partes de su misma especie. Se utiliza en las siguientes determinaciones: fósforo, potasio y micronutrientes, etc. Su uso es muy frecuente, ya que de partes por millón se puede pasar a por ciento y miliequivalente o viceversa (10).

❖ **Miliequivalentes por 100g de suelo**

Son expresiones comunes en los análisis de cationes cambiables, capacidad de intercambio de cationes y aniones solubles. El equivalente gramo de un elemento es la cantidad de dicho elemento que se combina o desplaza un átomo- gramo de hidrógeno. El miliequivalente es igual al peso equivalente dividido por mil. El equivalente químico de un elemento es igual al peso atómico dividido por su valencia común (10).

6.1.7 CORRELACION DE METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE SUELOS

Para establecer que tan asociadas están dos o más variables en cuanto a la variabilidad que tienen en común (por ejemplo: metodologías, dosis, etc.), se hace uso comúnmente de la medida de tendencia llamada: análisis de correlación lineal.

❖ **ANÁLISIS DE CORRELACIÓN LINEAL**

El coeficiente de correlación presenta el grado de covariación entre dos variables, pero también se puede interpretar como una medida de la

exactitud del ajuste de la recta de regresión. El uso más adecuado es en los casos en que no hay dirección de dependencia. El análisis de correlación es técnicamente neutral no prueba causa y efecto (16).

Coeficiente de correlación lineal r

Es la medida de la intensidad de la relación lineal entre dos variables. El coeficiente refleja el grado de relación o efecto que tiene el cambio de una variable sobre la otra. El valor del coeficiente de correlación lineal ayuda a contestar la pregunta: ¿existe correlación entre las dos variables consideradas? El coeficiente siempre tiene un valor entre -1 y +1. Un valor igual a +1, o bien -1 indica una **correlación positiva o una correlación negativa perfecta**, respectivamente (9).

6.2 MARCO REFERENCIAL

6.2.1 PROCEDENCIA DE LAS MUESTRAS DE SUELOS ANALIZAR

Las muestras de suelos a ser analizadas, fueron recolectadas de diferentes zonas del país, para que sean representativas de la variabilidad de suelos. La recolección fue realizada por estudiantes de la Universidad de Brigham Young, obteniendo un número variable de muestras de los diferentes puntos del país, ver cuadro 1.

Cuadro 1. Lugares de muestreo y número de muestras

Lugar	Número de muestras
Costa Sur	19
Cobán	21
Lago de Izabal	20
Petén, alrededor de Chisec	16
Región de los volcanes, en la parte oeste	20
Chiquimula, en el municipio de San Juan Ermita.	19

Para referenciar geográficamente los lugares de muestreo ver el anexo 1. Para cultivos y nombres específicos de dónde se obtuvieron las muestras, ver anexos 4 , 5, 6, 7, 8 y 9.

6.2.2 INVESTIGACIONES REALIZADAS SOBRE METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE SUELOS

❖ Comportamiento y manejo del fósforo en la fertilización de caña de azúcar en suelos de origen volcánico, Guatemala.

En 1998 se analizaron con la colaboración del laboratorio de soluciones analíticas 40 muestras de suelo de 10 sitios experimentales de fósforo con tres métodos de extracción que fueron los siguientes (11):

1. Carolina del Norte (Mehlich 1) 0.05M HCl +0.0125 M H₂SO₄ (Mehlich, 1953).
2. Carolina del Norte (Mehlich 3) 0.2 M Ac. Acético + 0.25 M NH₄-NO₃ + 0.015 M NH₄F + 0.13 M CHNO₃ + 0.001M EDTA (Mehlich, 1984).
3. Resina de intercambio. Remoción de fósforo por resina aniónica sin alteración de pH (Cooperband and Logan, 1992).

Se realizó análisis de correlación lineal con los datos de fósforo extractable de cada método con los otros (11).

Es evidente la alta correlación lineal positiva entre los valores de fósforo extraídos con los tres métodos, alcanzando coeficientes de correlación hasta de 0.98 (Mehlich versus Resina). La correlación altamente significativa encontrada entre los tres métodos de extracción de fósforo para estos suelos es importante e indica que puede utilizarse indistintamente cualquiera de ellos en la medición. Esta flexibilidad permite escoger aquél método menos complicado, más rápido y práctico (11).

Un número grande de muestras de suelo (347 muestras) fue analizado más adelante con Mehlich 1 y Mehlich 3 (Métodos rutinarios utilizados en Guatemala). Los resultados indicaron una significativa correlación con un coeficiente de correlación de (r) de 0.77 entre estas dos metodologías. Para el efecto se estableció una relación lineal (regresión lineal) de Mehlich 1 = $0.889 + 0.747$ (Mehlich 3); (R^2 0 0.60). La relación indica que Mehlich 3 extrae un poco más fósforo que Mehlich 1 en éstos suelos (11).

Se establecieron 3 rangos de interpretación de análisis de fósforo (mehlich 1) (11).

Bajo: < 10 ppm

Medio: $\geq 10 - 20$ ppm

Alto: ≥ 30 ppm

❖ Otras investigaciones

Otros estudios de correlación de metodologías de extracción de Fósforo, como en suelos de California que mostraron más de 0.13 ppm de Fósforo en el extracto de agua no respondieron en rendimiento a la fertilización fosforada (Bingham, 1949; Martin & Buchanan, 1950; Martin & Mikkelsen, 1960). Thompson et al. (1960) encontraron una alta correlación entre el Fósforo tomado por el cultivo de sorgo y el Fósforo soluble en 22 suelos, la mayoría de los cuales eran ácidos. Fried y Shapiro (1956) observaron una pobre relación entre el Fósforo soluble en agua y el Fósforo tomado en 8 suelos ácidos en el extracto inicial, pero observaron una correlación mucho mejor en los 14 extractos sucesivos (1).

VII. METODOLOGÍA

7.1 DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES DE DISPONIBILIDAD DE FÓSFORO Y POTASIO

7.1.1 METODOLOGÍA DE DOBLE ÁCIDO DILUIDO

Se obtuvo los índices de disponibilidad de fósforo y potasio de 115 muestras de suelos. Se efectuaron tres réplicas para la metodología simplificada de la Universidad de Brigham Young y una réplica para la metodología de Doble Ácido Diluido.

- **DETERMINACIÓN DE FÓSFORO**

Para la **obtención del extracto**, inicialmente se pesó 5 gramos de suelo que fueron vaciados en un matraz. Luego se agregó 25 mililitros del Reactivo de Extracción y se agitó en el agitador eléctrico durante 5 minutos. Seguidamente se filtró la mezcla utilizando papel filtro No. 5 110 mm y recogió el extracto.

La **solución para la lectura**, se preparó tomando con una pipeta automática 2 mililitros del extracto que se vaciaron en un matraz, donde se agregó 18 mililitros de agua destilada y 5 mililitros del Reactivo B. Posteriormente se dejó en reposo la solución por 15 minutos para fomentar el color, que se tornó azul intenso, en el caso de un alto índice de disponibilidad de fósforo en la solución.

La **lectura del índice de disponibilidad de Fósforo** en la solución se hizo con base al porcentaje de transmitancia de la muestra en el espectrofotómetro (Spectronic 20) a una frecuencia 880 nanómetros, habiéndose colocado también el filtro rojo del aparato.

Finalmente se obtuvo el índice de disponibilidad de fósforo en el suelo, usando la tabla en la cual ya están determinadas las partes por millón

(ppm) para cada posible lectura de un porcentaje de transmitancia (%T), ver cuadro 2 en anexo 2.

- **DETERMINACIÓN DE POTASIO**

Debido a que se realiza el mismo procedimiento que para la obtención del extracto para la determinación de fósforo, se utilizó parte de ese extracto del cual con una pipeta automática se sacó 1 mililitro y vació en un matraz, dónde se agregó 24 mililitros de agua destilada.

Seguidamente se elaboró los **estándares** de 2, 6 y 12 partes por millón de potasio, que corresponden respectivamente al S_1 , S_2 y S_3 . Aunque previo a esto se elaboró estándares de 100 partes por millón del S_1 , S_2 y S_3 utilizando 5, 15 y 30 mililitros respectivamente de la solución de 1,000 ppm de potasio y se aforaron a 100 mililitros con agua destilada. Finalmente se tomó 1 ml de cada uno de los estándares de 100 partes por millón del S_1 , S_2 y S_3 y agregó a cada uno 24 mililitros de agua destilada.

La **lectura del índice de disponibilidad de potasio** en la solución se inició calibrando el espectrofotómetro de absorción atómica introduciendo los estándares (2, 6 y 12 ppm), y luego se colocaron los extractos y tomó las lecturas. Las lecturas fueron multiplicadas por el factor de dilución 125 para obtener las partes por millón de K en el suelo. Dicho factor se obtiene por la relación de 5 grs de suelo:25 ml de solución extractora, lo que da una relación de 5, el cual debe multiplicarse por la sumatoria de 1 ml del extracto de suelo + 24 ml de agua destilada, es decir 25 ml.

7.1.2 PROCEDIMIENTO SIMPLIFICADO DE LA UNIVERSIDAD DE BRIGHAM YOUNG

Con este procedimiento se hizo 3 réplicas por cada muestra de las 115 muestras de suelos en las que se determinaron los índices de disponibilidad de fósforo y potasio. Así mismo, se usó una muestra estándar. Ésta muestra formó parte de cada 30 muestras analizadas y su uso se

fundamentó en que permitió verificar si los instrumentos y equipos estaban siendo utilizados adecuadamente, y también, si los procedimientos de las metodologías fueron correctamente desarrollados. Evitando de este modo variaciones significativas en los resultados obtenidos de los análisis.

- **DETERMINACIÓN DE FÓSFORO**

Previo a realizar la extracción de nutrientes de las muestras de suelos a analizar, se preparó la **Percoladora de café expresso** para uniformizar su temperatura y obtener resultados confiables.

Se preparó la **Percoladora de café expresso** agregando 100 mililitros de agua destilada al depósito de agua. Luego se puso a funcionar la percoladora de café expresso y se colocó un recipiente en la base para recibir el agua. Cuando ya no salió más agua por el filtro se dejó salir el vapor. Este proceso se realizó dos veces.

El **extracto con los nutrientes** se obtuvo vaciando 5 gramos de suelo en la canasta porta filtro de la percoladora de café expresso, sobre un trozo de papel filtro No. 5 110 mm que fue previamente humedecido con agua destilada. Se agregó 100 mililitros de agua destilada en el depósito de la percoladora de café expresso y seguidamente se encendió la percoladora de café expresso para obtener el extracto que se recibió en un recipiente colocado en la base. Se consideró concluido el proceso de extracción cuando ya no salió más extracto por la canasta porta filtro. Finalmente se dejó salir el vapor antes de procesar la siguiente muestra.

Este extracto fue dividido volumétricamente en dos partes iguales, utilizando una para efectuar la determinación de P y la otra para la determinación de K.

La ***solución para la lectura***, se preparó vaciando 10 mililitros de agua destilada en un matraz, a los cuales se agregó 5 mililitros del extracto obtenido de la percoladora de café expresso y 5 mililitros del Reactivo B. Lo anterior se hizo con cada extracto de suelo y el testigo (agua destilada). Luego se agitó manualmente de forma leve la solución y se esperó 15 minutos antes de hacer la lectura.

Se ***calibró*** a 880 nanómetros con el filtro rojo el Espectrofotómetro (Spectronic 20) a cero y a cien por ciento de transmitancia para obtener lecturas confiables. Para colocarlo a cero por ciento de transmitancia, se utilizó el botón de encendido sin ninguna muestra. Luego para colocarlo a 100% la transmitancia se introdujo en el Espectrofotómetro (Spectronic 20) un tubo de ensayo especial para este equipo con agua destilada y giró hacia la derecha el botón que se encuentra al lado del de encendido hasta obtener 100% de transmitancia.

La ***lectura del índice de disponibilidad de fósforo*** en la solución, se hizo con base al porcentaje de transmitancia, para lo cual se utilizó el Espectrofotómetro (Spectronic 20).

Con el objeto lavar el tubo en donde se colocó la solución y evitar que restos del extracto medido anteriormente afectaran la nueva lectura, se agregó al tubo un poco del extracto al cual pretendía medírsele la transmitancia y se desechó. Luego se midió la transmitancia del resto del extracto.

- ***DETERMINACIÓN DE POTASIO***

El extracto utilizado se obtuvo del procedimiento para la determinación de fósforo. Se agregó más o menos 1 gr de Hidróxido de Calcio al extracto y se agitó manualmente para luego filtrarlo. La cantidad de hidróxido de calcio usada dependió de la intensidad de la turbidez del extracto.

La ***solución para la lectura*** se preparó vaciando 3 mililitros de EDTA + Formaldehído (relación 2:1) en un matraz, a los cuales se agregó 1 mililitro de extracto, 3 gotas de Goma Ghatti o Gum Arabic y se mezclaron, moviendo manualmente en forma circular el matraz con la solución. Posteriormente se agregó 1 mililitro de Borato Tetrafenílico (útil 1 mes) y se esperó durante 15 minutos. Los estándares (2, 4, 6, 8, 10 ppm K) fueron procesados como el extracto de las muestras de suelo analizadas.

Se **calibró** a 420 nanómetros sin el filtro rojo el Espectrofotómetro (Spectronic 20) a cero y a cien por ciento de transmitancia para obtener lecturas confiables, esto se realizó como se indicó para el caso de fósforo.

La ***lectura del índice de disponibilidad de potasio*** en la solución, se hizo de igual manera que para el fósforo.

- **OBTENCIÓN DE LAS PARTES POR MILLÓN DE “P” y “K” EN EL SUELO**

Para determinar los índices de disponibilidad de Fósforo en el suelo se utilizó la tabla del anexo 2. Porcentajes de Transmitancia y partes por millón de Fósforo de la metodología de Doble Ácido Diluido.

Para determinar los índices de disponibilidad de Potasio en la solución se convirtieron las transmitancias a logaritmos, luego se trazo una curva considerando en el eje de las ordenadas como variable dependiente los logaritmos de las transmitancias y en el eje de las abscisas como variable independiente las partes por millón conocidas de los estándares (0, 2, 4, 6, 8 y 10 ppm de Potasio) haciendo un total de 72 valores (6 estándares, 3 réplicas por 4 grupos de 30 muestras incluyendo el estándar de suelo). Se encontró que el mejor modelo fue el lineal, debido a que presentó el más alto coeficiente de determinación con un valor de 0.81 y mayor significancia,

ver figura 4. Luego se despejó de este modelo la variable independiente que era la desconocida en el caso de las muestras de suelo, es decir, las partes por millón, quedando la ecuación como sigue:

$$X = Y - 103.64 / 3.4262.$$

Donde:

X = partes por millón. Y = % de Transmitancia.

Una vez determinados los índices de disponibilidad de Potasio en las soluciones mediante la aplicación de la ecuación, se multiplicaron por 20, que es el factor de dilución, obtenido de la relación suelo: agua en la Percoladora de café expreso (5:100) para obtener los índices de disponibilidad de Potasio en las muestras. Mismo procedimiento se siguió para la determinación de las ppm de Nitrógeno, la ecuación y su coeficiente de determinación se muestran a continuación.

$$X = Y - 89.146 / 6.9382$$

Donde:

X = partes por millón. Y = % de Transmitancia.

El procedimiento simplificado BYU para Potasio, mostró una significativa variación de los valores obtenidos en cada réplica de sus estándares, de igual manera sucedió con los valores de las muestras de suelo.

7.2 Correlación de las metodologías de análisis de suelos

Una vez obtenidos los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio en los suelos y expresados en partes por millón con cada metodología de análisis de suelos. Se realizó una estratificación de acuerdo a la disponibilidad del nutrimento (bajo, medio, alto y muy alto), utilizando la tabla de parámetros para interpretación de resultados de análisis de suelos obtenidos con el método de extracción de Doble Ácido Diluido, generada por ANACAFÉ, ICTA y FAUSAC, para luego poder efectuar correlaciones según la estratificación definida. Para establecer el grado de correlación se utilizó la siguiente regla de decisión.

Cuadro 2. Regla de decisión del Coeficiente de Correlación

Si r es > 0	Existe correlación
Si r es < 0	No existe correlación
Si r : $0 - 0.4$	Correlación baja
Si r : $0.4 - 0.7$	Correlación media
Si r : $0.7 - 1.0$	Correlación alta

7.3 Comparación de los tiempos, procesos y costos variables de las metodologías para determinar Fósforo y Potasio.

Para determinar que metodología de las correlacionadas fue más rápida, se elaboró un diagrama de flujo de proceso y cronometró cada una de las operaciones necesarias para la determinación de los índices de disponibilidad de fósforo y potasio. En cuanto al costo invertido por análisis, éste se realizó utilizando los costos variables en los que se infirió con cada metodología.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSION

8.1 Determinación de índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio

8.1.1 Índices de disponibilidad de Fósforo

Los índices de disponibilidad de Fósforo de las 115 muestras de suelo, se obtuvieron con las metodologías DAD (Doble Ácido Diluido) y Procedimiento BYU (Procedimiento Simplificado de la Universidad de Brigham Young), (ver anexos 10-15).

Los índices de las dos metodologías se plotearon en un gráfico de dispersión, observándose que los mismos aparecen distribuidos en un rango de 0 a 90 ppm. El 54% de los índices se encuentran en el rango de 0-10 ppm, el 15.5% en el rango de 10-30 ppm y el 30.5% restante de los índices de disponibilidad mayores de 30 ppm, (Figura 6).

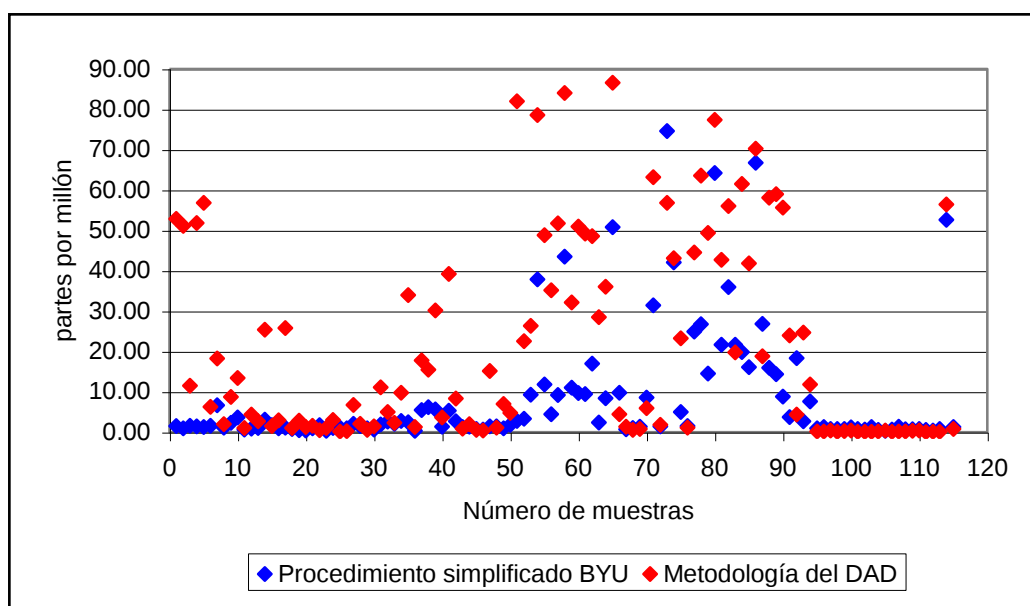


Figura 4. Índices de disponibilidad de Fósforo obtenidos con el procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young y la metodología de Doble Ácido Diluido.

En el gráfico de dispersión de los índices de disponibilidad de Fósforo, se observa que en el rango de 0-10 ppm y los mayores a 30 ppm, las dos

metodologías presentan un mayor grado de relación, en comparación al rango de 10-30 ppm.

8.1.2 Índices de disponibilidad de Potasio.

Se obtuvo los índices de disponibilidad de Potasio de las 115 muestras de suelo con las metodologías en estudio, y plotearon en un gráfico de dispersión. Los índices aparecen en un rango de 0 a 1.5 meq/100 gr de suelo. El 21.0% de los índices se encuentra en el rango de 0.1-0.3 meq/100 gr de suelo; el 9.0% entre el rango de 0.3-0.4 meq/100 gr de suelo; el 67.0% entre el rango de 0.4-1.1 meq/100 gr de suelo y el 3% restante están más allá de los 1.1 meq/100 gr de suelo (Figura 12).

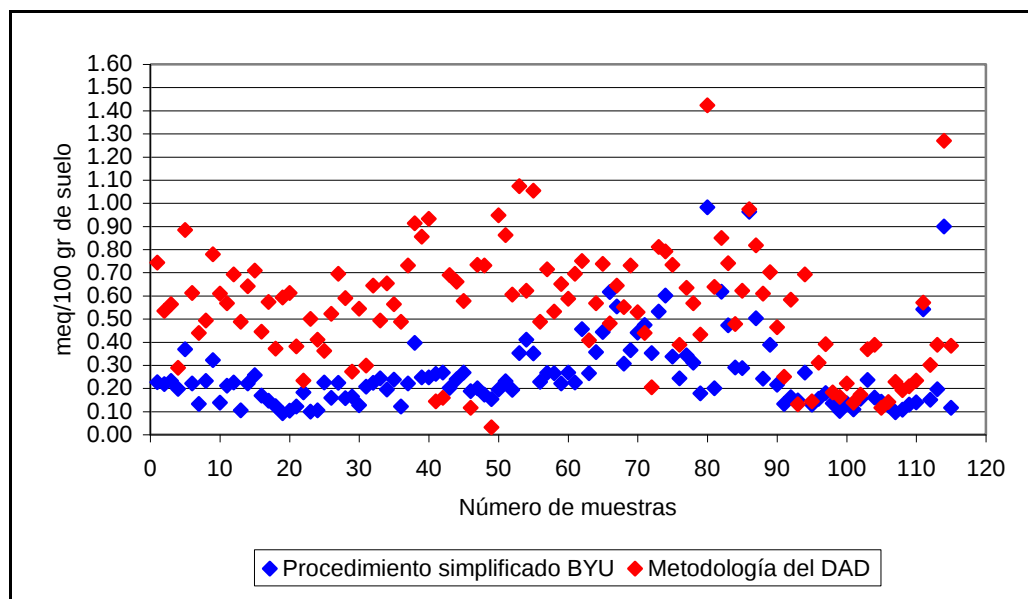


Figura 5. Índices de disponibilidad de Potasio obtenidos con el procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young y la metodología de Doble Ácido Diluido.

Se observa en el gráfico de dispersión para los índices de disponibilidad de Potasio, que la mayoría de los índices obtenidos con el Procedimiento BYU, presentaron valores más bajos, en relación con los de la metodología del DAD.

8.2 Análisis de Correlación de las metodologías de Doble Ácido Diluido y el Procedimiento Simplificado BYU.

8.2.1 Análisis de Correlación para Fósforo

Los índices de disponibilidad de Fósforo se estratificaron usando los parámetros de decisión: bajo, medio, alto y muy alto definidos para la metodología del DAD, con el fin de estimar de mejor forma la relación entre las metodologías (Anexo 3).

El análisis de correlación se realizó para cada uno de los estratos definidos y para todos los datos en general, (Cuadro 3).

Cuadro 3. Correlaciones para Fósforo entre las metodologías de análisis de suelos de Doble Ácido Diluido y el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young.

Índice de disponibilidad	Número de muestras	Coefficiente de correlación r
0 – 10 ppm (Bajo)	62	0.37
10 – 15 ppm (Medio)	4	0.23
15 – 30 ppm (Alto)	14	-0.29
> 30 ppm (Muy alto)	35	0.53
Incluye todas	115	0.70

El análisis de correlación con todas las muestras de suelo, presentó una correlación de 0.70, considerada como media. Esto difiere a lo observado en las correlaciones por estratos, ya que el 71% de los índices de disponibilidad de Fósforo, presentan una baja correlación entre el procedimiento simplificado BYU y la metodología del DAD.

La correlación entre las dos metodologías incluyendo todos los índices de disponibilidad de Fósforo, puede ocultar la verdadera relación entre ambas, porque la variabilidad se reduce cuando la cantidad de datos es mayor.

De acuerdo al análisis de correlación por estratos, la mayor correlación entre las metodologías es de 0.53, considerada como media, y se obtuvo en el rango de más de 30 ppm de Fósforo, definido como muy alto por la metodología del DAD.

Para los estratos de 0-10 ppm, 10-15 ppm y 15-30 ppm de Fósforo, las correlaciones entre las metodologías fueron bajas, con coeficientes que varían desde -0.29 hasta 0.37.

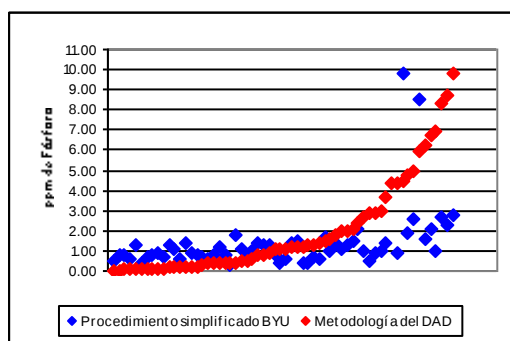


Figura 6. Índices de disponibilidad de Fósforo de 0-10 ppm (Bajo).

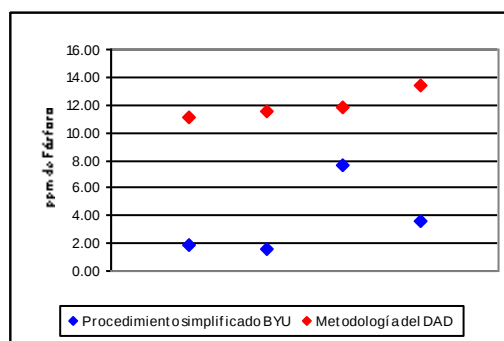


Figura 7. Índices de disponibilidad de Fósforo de 10-15 ppm (Medio).

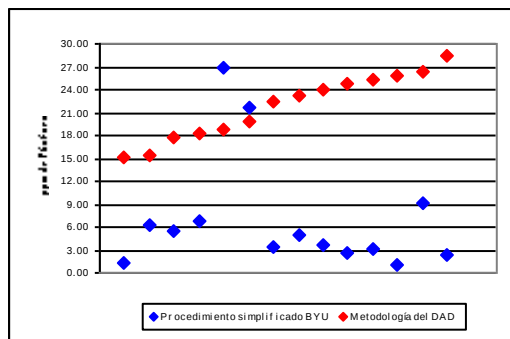


Figura 8. Índices de disponibilidad de Fósforo de 15-30 ppm (Alto).

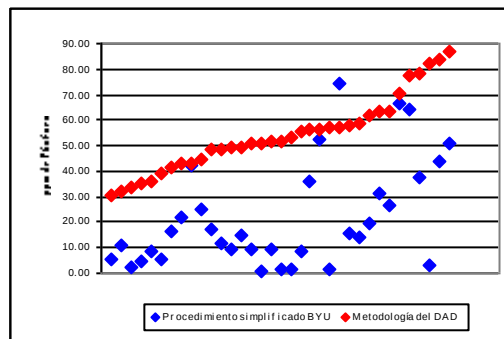


Figura 9. Índices de disponibilidad de Fósforo > 30 ppm (Muy alto).

El Procedimiento simplificado BYU, presenta mayor similitud en la extracción de Fósforo en comparación a la metodología del DAD, en suelos con índices de disponibilidad bajos (0-10ppm) y suelos con índices muy altos (>30ppm), no así en los índices medios y altos (10-30 ppm). En forma

general en este estudio, la correlación es baja entre las metodologías de análisis de suelos, (Figuras 8 y 11).

8.2.2 Análisis de Correlación para Potasio

Los índices de disponibilidad de Potasio fueron también estratificados utilizando los parámetros de decisión: bajo, medio, alto y muy alto definidos para la metodología del DAD, con la finalidad de encontrar de la manera más idónea la relación entre las dos metodologías (Anexo 3).

Se realizaron análisis de correlación entre el procedimiento simplificado BYU y la metodología del DAD por cada estrato definido, y uno incluyendo el total de los índices de disponibilidad de las 115 muestras de suelo, (cuadro 4).

Cuadro 4. Correlaciones para Potasio entre las metodologías de análisis de suelos de Doble Ácido Diluido y el procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young.

Índice de disponibilidad	Número de muestras	Coefficiente de correlación r
0.1 – 0.3 meq/100gr (Bajo)	24	0.07
0.3 – 0.4 meq/100gr (Medio)	10	0.05
0.4 – 1.1 meq/100gr (Alto)	77	0.41
> 1.1 meq/100gr (Muy alto)	4	0.96
Incluye todas	115	0.63

En el cuadro 4, se puede observar que el 70% de los índices de disponibilidad de Potasio presentaron una media correlación, estableciéndose que existe de manera global una baja correlación entre el Procedimiento simplificado BYU y la metodología del DAD, para la extracción de Potasio. En la Figura 7, puede observarse que el 74% de los

índices de Potasio obtenidos con el procedimiento simplificado BYU fueron notablemente inferiores a los obtenidos con la metodología del DAD.

La mayor correlación entre las metodologías de análisis de suelos de acuerdo a los estratos, fue de 1.0, considerada como alta, se obtuvo cuando los índices de disponibilidad fueron mayores a 1.1 meq/100gr, considerados como índices muy altos según la metodología del DAD. Sin embargo, el número de muestras utilizado para esta correlación es muy pequeño, por lo tanto se considera que no es representativa de correlaciones por estratos. No así, la correlación de 0.40, considerada como baja, encontrada para el estrado de 0.4 – 1.1 meq/100gr, rango dentro del cual los índices son definidos como altos según la metodología del DAD, en el cual se incluyen el 69% de los índices.

Para los estratos de los rangos 0.1 – 0.3 meq/100gr y 0.3 – 0.4 meq/100gr, las correlaciones entre las metodologías fueron bajas, variando de 0.05 hasta 0.07.

El Procedimiento simplificado BYU, no presenta una buena similitud en la extracción de Potasio en comparación a la metodología del DAD, en suelos con índices de disponibilidad bajos (0.1-0.3 meq/100 gr) y medios (0.3-0.4 meq/100 gr), (Figuras 12 y 13).

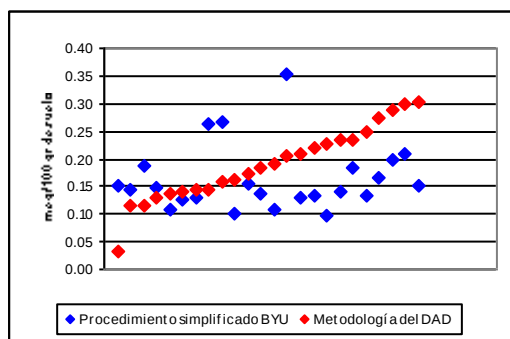


Figura 10. Índices de disponibilidad de Potasio de 0.1-0.3 meq/100 gr de suelo

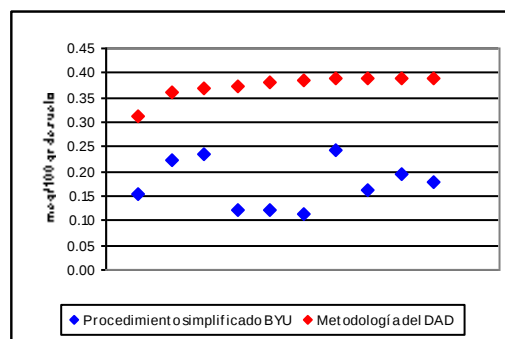


Figura 11. Índices de disponibilidad de Potasio de 0.3-0.4 meq/100gr de suelo

(Bajo).

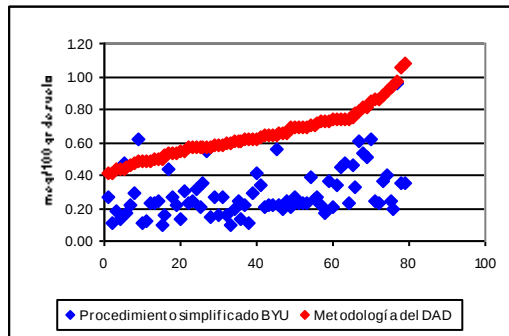


Figura 12. Índices de disponibilidad de Potasio de 0.4-1.1 meq/100 gr de suelo (Alto).

(Medio).

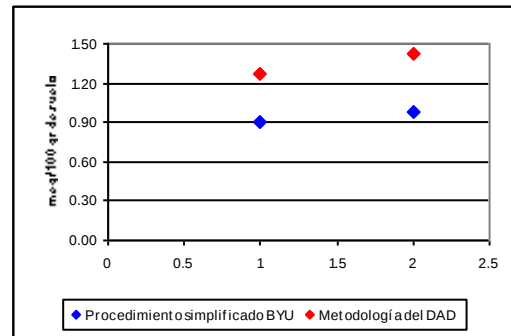


Figura 13. Índices de disponibilidad de Potasio > 1.1 meq/100 gr de suelo (Muy alto).

8.3 Comparación de tiempos, procesos y costos variables de las metodologías para determinar Fósforo y Potasio.

8.3.1 Comparación de tiempos y procesos de las metodologías para determinar Fósforo y Potasio

Las actividades y sus respectivos tiempos, para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio, con el Procedimiento BYU y la metodología del DA, se representaron en un diagrama de flujo de proceso, (ver anexos del 16 al 19).

La comparación entre las metodologías de análisis de suelos, se hizo utilizando los cuadros resumen, que se obtuvieron al final de analizar los diagramas de flujo de proceso.

Cuadro 5. Cuadro resumen del diagrama de flujo de proceso para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo con la metodología de Doble Ácido Diluido.

SIMBOLO	ACTIVIDAD	CANTIDAD	TIEMPO
---------	-----------	----------	--------

	Almacén	1	0
	Operación	6	900 segundos.
	Inspección	0	0
	Oper/Inspecc.	2	1043 segundos.
	Demoras	1	900 segundos.
TOTAL			2,843 segundos ó 47.38 minutos.

En los cuadros 5 y 6, se observa que para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo, el procedimiento simplificado BYU fue 5 minutos más rápido que la metodología del DAD, sin embargo, su ejecución requirió la realización del doble de operaciones en relación a la metodología del DAD.

Cuadro 6. Cuadro resumen del diagrama de flujo de proceso para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo con el procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young.

SIMBOLO	ACTIVIDAD	CANTIDAD	TIEMPO
	Almacén	1	0
	Operación	12	1,135 segundos.
	Inspección	0	0
	Oper/Inspecc.	3	208
	Demoras	2	1,200 segundos.
TOTAL			2,543 segundos ó 42 minutos.

En los cuadros 7 y 8, se observa que para la determinación de los índices de disponibilidad de Potasio, la metodología del DAD fue 13 minutos más rápida que el Procedimiento BYU, además, la aplicación del Procedimiento BYU requirió del doble de operaciones en relación a la metodología del DAD.

Cuadro 7. Cuadro resumen del diagrama de flujo de proceso para la determinación de los índices de disponibilidad de Potasio con la metodología de Doble Ácido Diluido.

SIMBOLO	ACTIVIDAD	CANTIDAD	TIEMPO
	Almacén	1	0
	Operación	6	720 segundos.
	Inspección	0	0
	Oper/Inspecc.	3	1163 segundos.
	Demoras	1	900 segundos.
TOTAL			2,783 segundos ó 46.38 minutos.

Cuadro 8. Cuadro resumen del diagrama de flujo de proceso para la determinación de los índices de disponibilidad de Potasio con el procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young.

SIMBOLO	ACTIVIDAD	CANTIDAD	TIEMPO
	Almacén	1	0
	Operación	12	1,255 segundos.
	Inspección	0	0
	Oper/Inspecc.	5	1,173
	Demoras	2	1,200 segundos.
TOTAL			3,628 segundos ó 60 minutos.

En conclusión, la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo, es más rápida con el Procedimiento simplificado BYU que con la metodología del DAD. Sin embargo, la determinación de los índices de disponibilidad de Potasio es más rápida con la metodología del DAD que con el Procedimiento simplificado BYU.

En cuanto a las operaciones realizadas, el Procedimiento simplificado BYU, duplicó el número de éstas, en relación a la metodología del DAD, tanto para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo, como para la determinación de los índices de disponibilidad de Potasio,

8.3.2 Comparación de costos variables de las metodologías para determinar Fósforo y Potasio

Otra variable considerada en este estudio fueron los costos variables para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio, del Procedimiento BYU y la metodología del DAD (ver los anexos 20 y 21).

Cuadro 9. Costo variable para determinar Fósforo y Potasio en 1 muestra de suelo con la metodología de Doble Ácido Diluido.

COSTOS VARIABLES	Reactivos	Costo/Q.
1.- Reactivo de extracción	1.- Ácido Clorhídrico Concentrado	Q. 0.12
	2.- Ácido Sulfúrico Concentrado	Q. 0.05
	3.- Agua destilada	Q. 1.46
2.- Reactivo "A"	1.- Molibdato de Amonio	Q. 1.70
	2.- Tartrado de Antimonio-potasio	Q. 0.07
	3.- Ácido Sulfúrico	Q. 0.98
	4.- Agua destilada	Q. 0.28
3.- Reactivo "B"	1.- Ácido Ascórbico	Q. 1.54
4.- Papel filtro No. 2 110 mm DIA PACK		Q. 23.32
5.- Agua destilada (FÓSFORO)		Q. 1.05
6.- Agua destilada (POTASIO)		Q. 1.40
7.- 5% de imprevistos		Q. 1.60
TOTAL		Q. 33.60

Cuadro 10. Costo variable para determinar Fósforo y Potasio en 1 muestra de suelo con el procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young.

COSTOS VARIABLES	Reactivos	Costo/Q.
1. Reactivo de extracción	1.- Agua destilada	Q. 0.29
2.- Reactivo "A"	1.- Molibdato de Amonio	Q. 1.70
	2.- Tartrado de Antimonio-potasio	Q. 0.07
	3.- Ácido Sulfúrico	Q. 0.98
	4.- Agua destilada	Q. 0.28
3.- Reactivo "B"	1.- Ácido Ascórbico	Q. 1.54
4.- Papel filtro No. 2 110 mm DIA PACK		Q. 11.66
5.- Agua destilada (FÓSFORO)		Q. 0.58
6.- Solución EDTA +	1.- EDTA	Q. 0.25
	3.- Formaldehído	Q. 0.69

Formaldehído	2.- Hidróxido de sodio	
--------------	------------------------	--

...continuación del cuadro 10

Cuadro 10. Costo variable para determinar Fósforo y Potasio en una muestra de suelo con el procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young.

	4.- Agua destilada	Q. 0.15
7.- Solución Borato tetrafenílico de sodio	1.- Borato tetrafenílico de sodio	Q. 29.66
	3.- Agua destilada	Q. 0.11
8.- Solución goma Gatti		
	1.- Gum Arabic	Q. 0.09
	2.- Agua destilada	Q. 0.04
9.- Hidróxido de calcio		Q. 15.91
10.- 5% de imprevistos		Q. 3.20
TOTAL		Q. 67.20

En los cuadros 9 y 10 se observa que el costo variable del Procedimiento BYU duplicó el costo variable de la metodología del DAD. Sin embargo, esto es en lo que respecta a costos variables, porque sin lugar a duda, el costo del equipo utilizado en la metodología del DAD es mucho mayor que el utilizado por el Procedimiento BYU, al menos en cuanto a la determinación del índice de disponibilidad de Potasio, en la cual se utiliza el Espectrofotómetro de Absorción Atómica. Para la determinación de Fósforo el equipo utilizado es el mismo en ambas metodologías.

IX. CONCLUSIONES

- ❖ Las correlaciones por estratos para la extracción de Fósforo, entre las metodologías de Doble Ácido Diluido y el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young fueron bajas, encontrándose dentro éstas, mejores correlaciones cuando los índices de disponibilidad fueron bajos (0-10ppm) y muy altos (>30ppm).
- ❖ Las correlaciones por estratos para la extracción de Potasio, entre las metodologías de Doble Ácido Diluido y el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young fueron bajas, encontrándose dentro de éstas, mejores correlaciones cuando los índices de disponibilidad fueron altos (0.4 – 1.1 meq/100gr) y muy altos (> 1.1 meq/100gr).
- ❖ La determinación de los índices de disponibilidad de Potasio con el Procedimiento simplificado BYU, carece de reproducibilidad, debido a que los valores de los estándares y muestras de suelo variaron significativamente en cada réplica.
- ❖ A partir de los diagramas de flujo de proceso y costos variables, para la determinación de Fósforo y Potasio, de las metodologías de Doble Ácido Diluido y el Procedimiento simplificado de la Universidad de Brigham Young, la metodología del DAD es la mejor opción en cuanto al número de operaciones y costo en relación al Procedimiento simplificado BYU.

X. RECOMENDACIONES

- ❖ Las bajas correlaciones para la extracción de Fósforo, obtenidas entre el Procedimiento simplificado de la Universidad Brigham Young asociado con la metodología de Doble Ácido Diluido (DAD), indican que el Procedimiento simplificado BYU, necesita ser ajustado, con el fin de obtener extracciones de Fósforo mucho más similares a las obtenidas con la metodología del DAD.
- ❖ Las medias correlaciones por estratos encontradas para la determinación de Potasio, entre el Procedimiento simplificado de la Universidad Brigham Young y la metodología de DAD; y además la variación de los valores de los estándares y muestras de suelo en cada repetición, indican que el Procedimiento simplificado BYU, indudablemente necesita ser perfeccionado para constituirse en una metodología sustitutiva de la metodología del DAD.
- ❖ El Procedimiento simplificado de la Universidad Brigham Young, debe ser validado en campo, mediante una correlación entre la cantidad de Fósforo extraído y la respuesta de un cultivo “X” a la aplicación de Fósforo.
- ❖ Considerando los procesos y costos variables para la determinación de los índices de disponibilidad de Fósforo y Potasio, de las metodologías en estudio, debe investigarse como reducir el número de operaciones y los costos variables del Procedimiento simplificado BYU.

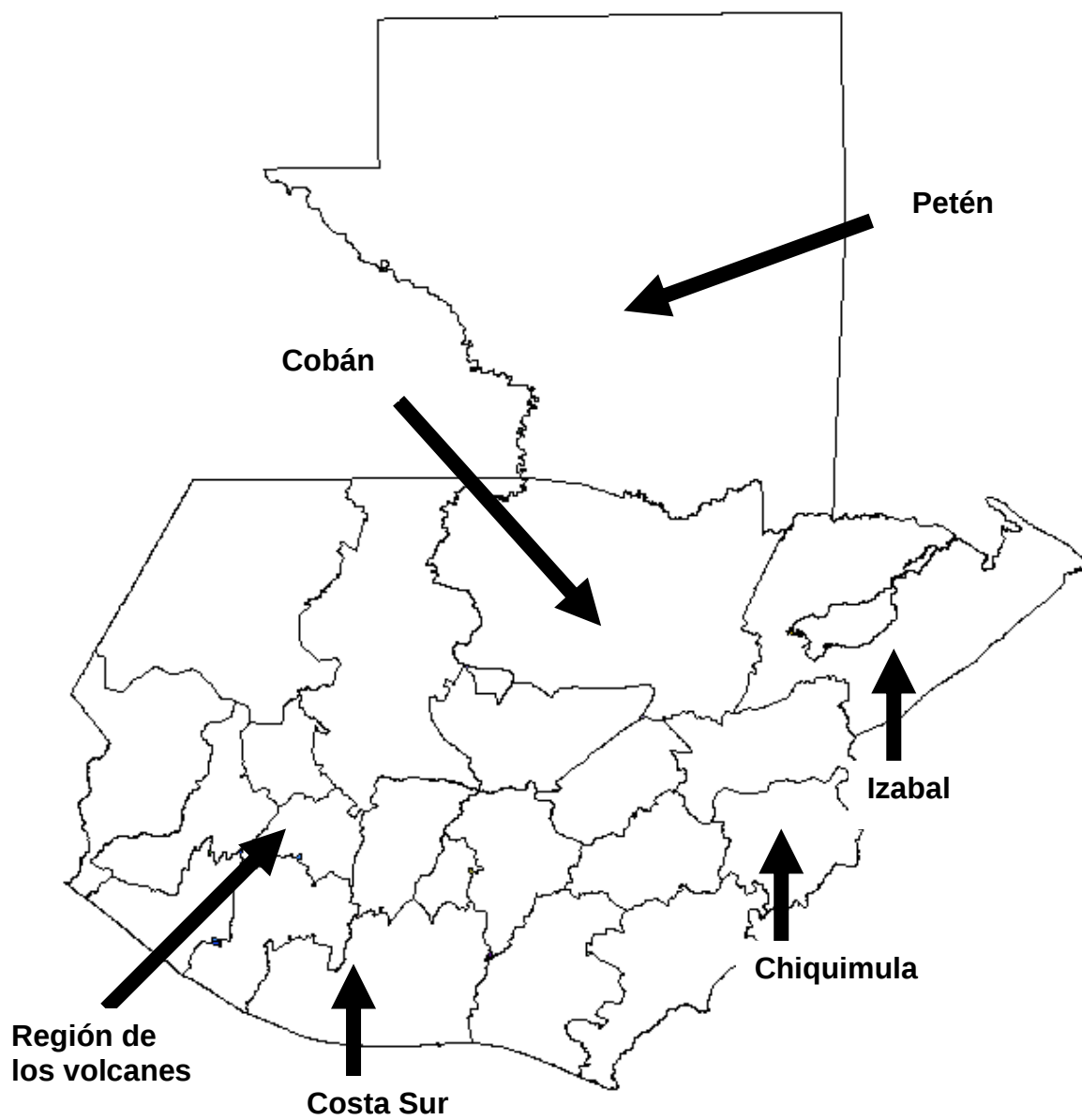
XI. BIBLIOGRAFÍA

1. Black, CA; Evans, DD; White, JJ; Ensminger, LE; Clark, FE. 1982. Methods of soil analysis: chemical and microbiological properties. Madison, Wisconsin, US, Editorial pte 2, p. 1035-1047.
2. Conti, ME. 2002. Dinámica de la liberación y fijación de potasio en el suelo (en línea). Buenos Aires, Ar. Consultado 15 nov. 2003. Disponible en <http://www.ppi-ppic.org/ppiweb/itams.nsf/87cb8a98bf72572b85256.html>
3. Diaz-Romeu, R; Hunter, A. 1982. Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigaciones en invernaderos. Turrialba, CR, Editorial p.62. (Serie materiales de enseñanza no.12.)
4. Enciclopedia práctica de la agricultura y la ganadería. 1999. Barcelona, Es, Grupo editorial Océano. p. 64-69
5. Equipo del Proyecto Fertilizar –INTA Pergamino, AR. 2002. Movilidad del fósforo en el suelo. (en línea) Argentina Consultado 14 de nov. 2003. Disponible en <http://www.fertilizar.org.ar/articulos/articulos.asp>
6. Estrada, LL. 1998. Evaluación de la fertilidad de suelos. *In* Manual agrícola Superb. Guatemala, Productos Superb. p. 71.
7. Gibson, K. 2003. Procedimiento simplificado para análisis de suelos para agricultura en pequeña escala (correo electrónico). Provo, Utah, Brigham Young University.
8. Instituto de la potasa y el fósforo, Mx. 1997. Manual internacional de fertilidad de suelos, versión española. Queretaro, Mx, Editorial del Instituto de la potasa y el fósforo. 134 p.
9. Jonson, R. 1990. Estadística elemental. México, Grupo editorial Iberoamérica. p. 99-101.
10. Palmaven (VE) 1998. Análisis de suelos y su interpretación. Venezuela, editorial PDVSA. p. 10-11. (Serie técnica).
11. Pérez, AJ et al. 2001. Evaluación de la respuesta a la fertilización fosforada en la zona cañera de Guatemala, segunda soca. *In* Memoria de presentación de resultados de investigación zafra 2000-2001. Guatemala. p. 86—90.

12. Plank 1, OC. 2003. Nutrient extraction and chemical analysis (en línea). Consultado 15 nov. 2003. Disponible en <http://www.cropsoil.uga.edu/turfExtraction/extraction.html>
13. Universidad Nacional de Educación a Distancia, ES. 2000. Mineralogía (en línea). Consultado 10 oct. 2003. Disponible en <http://www.uned.es/cristamine>
14. Urbano, PT. 1999. Tratado de fitotecnia general. 2 ed. Madrid, EC, Ediciones Mundi Prensa. p. 516- 517; 548- 549.
15. USAC (Universidad de San Carlos de Guatemala). 1993. Diagnóstico de los recursos naturales y ambiente. Guatemala, p. 70-74; 131-132.
16. Yamane, T. 1987. Estadística. Trad. N Cortado de Kohan y N. Civetta Arzagús. México, Editorial Harla. P 87.

XII. ANEXOS

Anexo 1. Procedencia de las muestras de suelos a analizar



Anexo 2. Porcentajes de Transmitancia y partes por millón de Fósforo.

% T	ppm	% T	ppm	% T	ppm	% T	ppm	% T	ppm
0.00	89.89	17.00	61.47	34.00	37.64	51.00	23.24	68.00	13.08
0.50	89.05	17.50	60.63	34.50	37.12	51.50	22.89	68.50	12.76
1.00	88.22	18.00	59.80	35.00	36.51	52.00	22.55	69.00	12.50
1.50	87.38	18.50	58.96	35.50	36.10	52.50	22.21	69.50	12.24
2.00	86.55	19.00	58.12	36.00	35.61	53.00	21.87	70.00	11.99
2.50	85.71	19.50	57.29	36.50	35.18	53.50	21.54	70.50	11.73
3.00	84.86	20.00	56.48	37.00	34.63	54.00	21.21	71.00	11.46
3.50	84.04	20.50	55.61	37.50	34.16	54.50	20.88	71.50	11.23
4.00	83.20	21.00	54.75	38.00	33.69	55.00	20.55	72.00	10.99
4.50	82.37	21.50	53.92	38.50	33.22	55.50	20.23	72.50	10.74
5.00	81.53	22.00	53.10	39.00	32.26	56.00	19.91	73.00	10.50
5.50	80.69	22.50	52.30	39.50	32.62	56.50	19.60	73.50	10.25
6.00	79.86	23.00	51.52	40.00	31.86	57.00	19.28	74.00	10.01
6.50	79.02	23.50	50.77	40.50	31.43	57.50	18.97	74.50	9.77
7.00	78.19	24.00	50.00	41.00	30.99	58.00	18.67	75.00	9.54
7.50	77.35	24.50	49.28	41.50	30.56	58.50	18.36	75.50	9.30
8.00	76.51	25.00	48.56	42.00	30.13	59.00	18.08	76.00	9.07
8.50	75.68	25.50	47.86	42.50	29.71	59.50	17.76	76.50	8.85
9.00	74.84	26.00	47.17	43.00	29.30	60.00	17.46	77.00	8.60
9.50	74.10	26.50	46.62	43.50	28.89	60.50	17.17	77.50	8.37
10.00	73.17	27.00	45.83	44.00	28.48	61.00	16.88	78.00	8.14
10.50	72.33	27.50	45.17	44.50	28.09	61.50	15.59	78.50	7.92
11.00	71.50	28.00	44.53	45.00	27.68	62.00	16.30	79.00	7.69
11.50	70.66	28.50	43.61	45.50	27.29	62.50	16.01	79.50	7.47
12.00	69.83	29.00	43.29	46.00	26.90	63.00	15.73	80.00	7.24
12.50	68.99	29.50	42.68	46.50	26.52	63.50	15.45	80.50	7.02
13.00	68.15	30.00	42.08	47.00	26.12	64.00	15.17	81.00	6.50
13.50	67.32	30.50	41.50	47.50	25.76	64.50	14.83	81.50	6.38
14.00	66.48	31.00	40.92	48.00	25.39	65.00	14.62	82.00	6.27

14.50	65.64	31.50	40.35	48.50	25.02	65.50	14.35	82.50	6.15
15.00	64.81	32.00	39.79	49.00	24.66	66.00	14.08	83.00	5.94
15.50	63.97	32.50	39.24	49.50	24.30	66.50	13.81	83.50	5.72
16.00	63.14	33.00	38.70	50.00	23.94	67.00	13.54	84.00	5.51
16.50	62.30	33.50	38.16	50.50	23.59	67.50	13.28	84.50	5.30

... continuación del anexo 2

% T	ppm	% T	ppm	% T	ppm	% T	ppm	% T	ppm
85.00	5.09	88.50	3.66	92.00	2.28	95.50	0.95	99.00	0.10
85.50	4.88	89.00	3.46	92.50	2.09	96.00	0.77	99.50	0.09
86.00	4.68	89.50	3.26	93.00	1.90	96.50	0.67		
86.50	4.47	90.00	3.06	93.50	1.71	97.00	0.58		
87.00	4.27	90.50	2.86	94.00	1.62	97.50	0.49		
87.50	4.06	91.00	2.57	94.50	1.33	98.00	0.39		
88.00	3.86	91.50	2.47	95.00	1.14	98.50	0.29		

Anexo 3. Parámetros para interpretación de resultados de análisis de suelos obtenidos con el método de extracción de Doble Ácido Diluido (0.05N HCl, 0.025N H₂SO₄).

ELEMENTO	DECISIÓN			
	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Fósforo (ppm)	0 – 10	10 – 15	15 – 30	> 30
Potasio (Meq/100g)	0.1 – 0.3	0.3 – 0.4	0.4 – 1.1	> 1.1

Fuente: ANACAFE, ICTA, FAUSAC.

Anexo 4. Lugares de la Costa Sur y cultivos, dónde fueron tomadas muestras de suelos.

Código	Lugar	Cultivo	
		Nombre Común	Nombre Técnico
COA 02	San José	Caña de azúcar	(<i>Saccharum officinarum</i> L.)
COA 04	San José	Cocotero y Banano	(<i>cocos nucifera</i> L.) y (<i>Musa x paradisiaca</i> L.)
COA 05	San José	Pasto	
COA 06	San José	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
COA 07	San José	Banano	(<i>Musa x paradisiaca</i> L.)
COA 08	San José	Maicillo	(<i>Sorgum bicolor</i>)
COA 09	San José	Banano	(<i>Musa x paradisiaca</i> L.)
COA 10	San José	Plátano y Sandía	(<i>Musa x paradisiaca</i> L.)
COA 11	San José	Limón persa	(<i>Citrus limon</i> L.)
COA 12	San José	Caña de azúcar	(<i>Saccharum officinarum</i> L.)
COA 13	San José	Caña de azúcar	(<i>Saccharum officinarum</i> L.)
COA 14	Iztapa	Caña de azúcar	(<i>Saccharum officinarum</i> L.)
COA 15	Iztapa	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
COA 16	Iztapa	Caña de azúcar	(<i>Saccharum officinarum</i> L.)
COA 17	Iztapa	Caña de azúcar	(<i>Saccharum officinarum</i> L.)
COA 18	Iztapa	Caña de azúcar	(<i>Saccharum officinarum</i> L.)
COA 19	Monte Rico	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
COA 20	Taxisco	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)

Estos según la génesis del suelo están incluidos en las siguientes unidades:

VIII Suelos desarrollados sobre cenizas volcánicas a elevaciones altas.

IX Suelos desarrollados sobre material fluvio-volcánico reciente a elevaciones medianas.

X Suelos desarrollados sobre material fluvio-volcánico reciente a elevaciones bajas.

Anexo 5. Lugares de Cobán y cultivos, dónde fueron tomadas muestras de suelos.

Código	Lugar	Cultivo	
		Nombre Común	Nombre Técnico
COB 01	CUNOR	Pacaya y Pino	(<i>Pinus spp.</i>)
COB 02	CUNOR	Naranja	(<i>Citrus aurantium L.</i>)
COB 03	Cobán	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
COB 04	Cobán	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
COB 05	Cobán	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
COB 06	Cobán	Cardamomo	(<i>Elettaria cardamomum</i>)
COB 07	Chilatz	Banano	(<i>Musa x paradisiaca L.</i>)
COB 08	Chilatz	Cardamomo	
COB 10	Chiquoyo	Café	(<i>Coffea arabica L.</i>)
COB 11	Chiquoyo	Café y Maíz	(<i>Coffea arabica L.</i>) y (<i>Zea mays L.</i>)
COB 12	Chiquoyo	Café y Leña	(<i>coffe arabica L.</i>)
COB 13	Chiquoyo	Cardamomo	
COB 14	Chiquoyo	Banano	(<i>Musa x paradisiaca L.</i>)
COB 15	Sechá Tolores	Cardamomo	
COB 16	Sechá Tolores	Maíz y Banano	(<i>Zea mays L.</i>)
COB 17	Santa Cruz	Huerto Familiar	
COB 18	Santa Cruz	Pino	(<i>Pinus spp.</i>)
COB 19	Santa Cruz	Tomate	(<i>Lycopersicum esculentum L.</i>)
COB 20	Santa Cruz	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)

Estos según la génesis del suelo están incluidos en las siguientes unidades:

- I Suelos desarrollados sobre rocas calcáreas a elevaciones bajas.
- III Suelos desarrollados sobre serpentina y rocas asociadas a elevaciones medianas.
- IV Suelos desarrollados sobre rocas calcáreas a elevaciones medianas.

Anexo 6. Lugares del Lago de Izabal y cultivos, dónde fueron tomadas muestras de suelos.

Código	Lugar	Cultivo	
		Nombre Común	Nombre Técnico
LAG 01	Quiriguá	Banano	(<i>Musa x paradisiaca</i> L.)
LAG 02	Quiriguá	Banano	(<i>Musa x paradisiaca</i> L.)
LAG 03	Las viñas	Pasto Napier	(<i>Pennisetum purpureum</i> S.)
LAG 04	Quiriguá	Banano	(<i>Musa x paradisiaca</i> L.)
LAG 05	Quiriguá	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
LAG 06	ICTA	Arroz experimental	(<i>Oryza sativa</i> L.)
LAG 07	Bendición	Arroz	(<i>Oryza sativa</i> L.)
LAG 08	Los Andes	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
LAG 09	Los Andes	Maíz y Yuca	(<i>Zea mays</i> L.) y (<i>Manihot esculenta</i> C.)
LAG 10	Los Andes	Arroz	(<i>Oryza sativa</i> L.)
LAG 11	Los Andes	Yuca	(<i>Manihot esculenta</i> C.)
LAG 12	Morales	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
LAG 13	Morales	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
LAG 14	Morales	Banano	(<i>Musa x paradisiaca</i> L.)
LAG 15	Morales	Chile	(<i>Capsicum</i> sp)
LAG 16	Guapinol	Frijol y Benrenjena	(<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) y (<i>Solanum melongena</i>)
LAG 17	Mariscos	Hule	(<i>Hevea brasiliensis</i> M.)
LAG 18	Izabal	Hule	(<i>Hevea brasiliensis</i> M.)
LAG 19	Izabal	Hule	(<i>Hevea brasiliensis</i> M.)
LAG 20	Izabal	Hule	(<i>Hevea brasiliensis</i> M.)

Estos según la génesis del suelo están incluidos en las siguientes unidades:

- I Suelos desarrollados sobre rocas calcáreas a elevaciones bajas.
- II Suelos desarrollados sobre depósitos marinos a elevaciones bajas.
- III Suelos desarrollados sobre serpentina y rocas asociadas a elevaciones medianas.
- VI Suelos desarrollados sobre esquistos a elevaciones medianas.
- VII Suelos desarrollados sobre cenizas volcánicas a elevaciones medianas.

Anexo 7. Lugares del Petén, alrededor de Chisec y cultivos, dónde fueron tomadas muestras de suelos.

Código	Lugar	Cultivo	
		Nombre Común	Nombre Técnico
PET 01	Candelaria	Café y Banano	(<i>Coffea arabica</i> L.) y (<i>Musa x paradisiaca</i> L.)
PET 02	Candelaria	Maíz y Frijol	(<i>Zea mays</i> L.) y (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)
PET 03	Chisec	Maíz y Frijol	(<i>Zea mays</i> L.) y (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)
PET 04	Chisec	Huerto Familiar	
PET 05	Tucán	Pasto	
PET 06	Tucán	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
PET 07	Tucán	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
PET 08	Tucán	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
PET 09	El Cruce	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
PET 10	El Cruce	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
PET 11	El Cruce	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
PET 12	Secacao	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
PET 13	Secacao	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
PET 14	Chisec	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
PET 15	Chisec	Maíz	(<i>Zea mays</i> L.)
PET 16	Chisec	Huerto Familiar	

Estos según la génesis del suelo están incluidos en la siguiente unidad:

- I Suelos desarrollados sobre rocas calcáreas a elevaciones bajas.

Anexo 8. Lugares de la región de los volcanes, parte oeste y cultivos, dónde fueron tomadas muestras de suelos.

Código	Lugar	Cultivo	
		Nombre Común	Nombre Técnico
VOL 01	San Antonio	Frijol	
VOL 02	San Antonio	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
VOL 03	Santa Catarina	Frijol	
VOL 04	Santa Carina	Cilantro	
VOL 05	Santa Carina	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
VOL 06	San Antonio	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
VOL 07	Ciudad Vieja	Frijol	(<i>Zea mays L.</i>)
VOL 08	Ciudad Vieja	Café	
VOL 10	Jocotenango	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
VOL 11	Los Encuentros	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
VOL 12	Los Encuentros	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
VOL 13	Los Encuentros	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
VOL 14	Los Encuentros	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
VOL 15	Los Encuentros	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
VOL 16	Lago de Atitlán, Santiago	Maíz	(<i>Zea mays L.</i>)
VOL 17	Lago de Atitlán, Santiago	Tomate	(<i>Lycopersicum esculentum L.</i>)
VOL 18			
VOL 19			
VOL 20			

Estos según la génesis del suelo están incluidos en las siguientes unidades:

VIII Suelos desarrollados sobre cenizas volcánicas a elevaciones altas.

XI Suelos alpinos.

Anexo 9. Lugares del municipio de San Juan Ermita, departamento de Chiquimula dónde fueron tomadas muestras de suelos.

Código	Lugar
	SALITRÓN
MI100601	Potrero Espinal (lado sur de la calle)
MI120612	El Plan de las Mirandas (Lado sur-este)
MI120614	El Plan de las Mirandas II (Lado norte medio este)
MI120615	El Plan de las Mirandas II (Lado norte medio oeste)
MI130619	El Plan de las Mirandas II (Lado sur bajo)
	CHANCÓ
MI180626	Potrero Espinal o Bordo de Limón (Lado oeste de la otra colina)
MI180629	Potrero Ujushte (parte alta y oeste)
MI180630	Potrero Ujushte (parte alta y este)
MI180631	
	CORRAL DE PIEDRA
MI180635	Chagüatillo (Lado oeste, parte baja)
MI190637	Potrero Espinal (Lado nor-este de la colina, parte alta)
MI190639	Potrero Espinal (Lado nor-este de la colina, parte baja)
MI200651	Zarzal (La cumbre, parte oeste)
MI200652	Zarzal (La cumbre, parte baja)
MI200653	La Posa del Tontolo
MI200656	Corral de Piedras
MI200660	La Loma (Lado nor-este)

Estos según la génesis del suelo están incluidos en la siguiente unidad:

VII Suelos desarrollados sobre cenizas volcánicas a elevaciones medianas.