

Universidad Nacional Autónoma de México

**Programa de Posgrado en Ciencias de la
Tierra
Instituto de Geología**

**Fraccionamiento de P en suelos
volcánicos: impacto de desecación,
incendios y depósitos recientes de tefras**

TESIS

Para obtener el grado de Maestra en Ciencias
Presenta

NADESHDA COSETTE GALVÁN TEJADA

Tutora: Dra. Christina Siebe Grabach

2009



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A la memoria del Dr. F. Rafael Castro Schott y
A mi familia por ser la base de todos mis logros

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Instituto de Geología de la misma universidad por permitirme realizar mis estudios para este trabajo de investigación.

A la Dra. Chistina Siebe por dirigir y enriquecer esta tesis junto con todos los miembros del LEA que me apoyaron en este trabajo.

A Edgar Saúl Esquivel Victoria por todo el apoyo incondicional que me dio para concluir este trabajo.

A los sinodales por las aportaciones y comentarios hechos a esta tesis.

Contenido

	Pág.
1. Resumen	5
2. Summary	6
3. Introducción	8
4. Antecedentes	11
4.1. El P en las plantas	11
4.2. El P en el suelo	12
4.2.1. El P orgánico en suelos	14
4.2.2. El P inorgánico en suelos	15
4.3. Factores y procesos que influyen en la movilidad del P en el suelo	19
4.4. Métodos para analizar P en suelos (P disponible, fraccionamiento, P total)	23
4.5. El P en suelos volcánicos	25
5. Objetivos	29
6. Hipótesis	29
7. Materiales y Métodos	31
7.1. Sitio de estudio	31
7.2. Descripción de los suelos	32
7.3. Tratamiento previo de las muestras	34
7.4. Fraccionamiento de P	34
7.5. P total por FRX	38
7.6. Análisis de regresión lineal para investigar el efecto de los tratamientos previos (secado al aire y tratamiento térmico a 300° C) de las muestras	39
7.7. Análisis de correlación de las fracciones de P con las propiedades físicas y químicas de los suelos	40
8. Resultados	41
8.1. Reproducibilidad de las determinaciones de P	41
8.2 Efecto del secado y de la quema (tratamiento térmico a 300° C) de las muestras en la extracción de P de las diferentes fracciones	43
8.3 Distribución relativa de las extracciones de P a lo largo de la cronosecuencia	48
8.4 Fraccionamiento de P (Modelo de Walker y Syers)	52
8.5 P total	56
8.6 P total y su relación con la suma de las fracciones	57
8.7 Porcentaje de las fracciones respecto a la cantidad de P total	59
8.8 Correlaciones entre las diferentes fracciones de P y las propiedades de los suelos	62
9. Discusión	67
9.1. Muestras húmedas y desecadas	67
9.2. El efecto de la quema (tratadas térmicamente a 300° C)	67

9.3. Efecto de la depositación de tefras frescas en la disponibilidad del P	68
9.4. Evolución de las fracciones de P a lo largo de la cronosecuencia	68
9.5. Eficiencia del método de fraccionamiento de P	71
10. Conclusión	73
11. Referencias	75
Anexos	82

Relación de Figuras

	Pág.
Figura 1. Provincias geológicas de México, en la parte central la Faja Volcánica Transmexicana (en gris) y los sectores en que se divide. (Demant, 1978; Pasquaré <i>et al</i> , 1988).	8
Figura 2. Ciclo del P (Havlin, 1999).	12
Figura 3. Estructura del inositol fosfato.	15
Figura 4. Mecanismos de retención de P en el suelo (Brady, 1996).	17
Figura 5. Relación entre las diferentes especies de P en solución y el pH del suelo (Havlin, 1999).	19
Figura 6. Minerales predominantes en función del pH (Havlin, 1999).	20
Figura 7. Modelo de Walker y Syers (1976).	22
Figura 8. Evolución de suelos en función de la edad de la superficie y la precipitación en Lanzarote, España (Jahn y Stahr, 1996).	26
Figura 9. Formación de arcillas minerales en suelos volcánicos de las Islas Canarias en función de la precipitación media anual y la edad del material parental (Jahn y Stahr, 1996).	27
Figura 10. Ubicación de los sitios (▲) de colecta de las muestras utilizadas en este estudio.	31
Figura 11. Comparación de las regresiones lineales ajustadas a las concentraciones de P determinadas en las diferentes fracciones de P en muestras secas al aire y muestras que conservaron la humedad de campo. Cada punto representa el promedio de las dos réplicas analizadas de cada muestra (n=2).	44
Figura 12. Comparación de las regresiones lineales ajustadas a las concentraciones de P determinadas en los suelos secados al aire y los suelos que mantienen su humedad de campo en las diferentes fracciones de muestras provenientes de horizontes Ah y Bw.	45
Figura 13. Comparación entre las regresiones lineales ajustadas a las concentraciones de P determinadas en las diferentes fracciones de P en muestras secas al aire y muestras sometidas a un tratamiento térmico (quemadas). Cada punto representa el promedio de las dos réplicas	46

analizadas de cada muestra (n=2).

Figura 14.	Comparación entre las concentraciones de P determinadas en los suelos secados al aire y los suelos sometidos a un tratamiento térmico (quema) en las diferentes fracciones de muestras provenientes de horizontes Ah y Bw.	47
Figura 15.	Distribución relativa de las fracciones de P en muestras de horizontes Ah a lo largo de la cronosecuencia analizadas a humedad de campo (A), después de ser secadas al aire (B), y después de haber sido quemadas a 300 °C en una mufla (C).	49
Figura 16.	Distribución relativa de las fracciones de P en muestras de horizontes Bw a lo largo de la cronosecuencia analizadas a humedad de campo (A), después de ser secadas al aire (B), y después de haber sido quemadas a 300 °C en una mufla (C).	51
Figura 17.	Comportamiento de las fracciones de P en muestras de horizontes Ah a lo largo de la cronosecuencia analizadas a humedad de campo (A), después de ser secadas al aire (B), y después de haber sido quemadas a 300 °C en una mufla (C).	53
Figura 18.	Comportamiento de las fracciones de P en muestras de horizontes Bw a lo largo de la cronosecuencia analizadas a humedad de campo (A), después de ser secadas al aire (B), y después de haber sido quemadas a 300 °C en una mufla (C).	55
Figura 19.	Contenido de P total de las muestras de tefra y suelos volcánicos de las regiones de el Parícutín (▲), el Popocatepetl (■), La Sierra del Chichinautzin (●) y la Sierra Monte Alto/Monte Bajo (◆) en: (A) el horizonte Ah y (B) en el horizonte Bw.	56
Figura 20.	Comparación del P total (■) con las sumas de las fracciones de P a lo largo de la cronosecuencia analizadas a humedad de campo (*), después de ser secadas al aire (●), y después de haber sido quemadas a 300° C en una mufla (▼) en: (A) los horizontes Ah y (B) los horizontes Bw.	58
Figura 21.	Porcentaje de las fracciones respecto a la cantidad de P total en el horizonte Ah para muestras a humedad de campo (A), muestras secadas al aire (B) y muestras con tratamiento térmico a 300°C (C).	60
Figura 22.	Porcentaje de las fracciones respecto a la cantidad de P total en el horizonte Bw para muestras a humedad de campo (A), muestras secadas al aire (B) y muestras con tratamiento térmico a 300°C (C).	61
Figura 23.	Correlación del Fe extractable con oxalato (asociado a óxidos amorfos de Fe, Fe _o) con diferentes fracciones de P: (A) Pi extraído con NaOH, (B) Fracción de P Occ (modelo de Walker y Syers, 1976), (C) Po obtenido de la extracción con NaOH y (D) Fracción de Po (modelo de Walker y Syers, 1976) del horizonte Ah de las muestras secadas al aire.	63
Figura 24.	Correlación de la fracción de Po (modelo de Walker y Syers, 1976) con: (A) Al asociado al alofano (Al o -Al d) en muestras quemadas, (B) Fe asociado a organo-minerales (Fe p) en muestras quemadas y (C) Fe asociado a organo-minerales (Fe p) en el horizonte Ah de muestras	64

secadas al aire.

Figura 25.	Correlación entre la fracción de P Occ (modelo de Walker y Syers, 1976) con: (A) Porcentaje de P fijado, (B) Porcentaje de carbono en muestras húmedas en el horizonte Ah.	64
Figura 26.	Correlación del Fe extractable con ditionito (Fed) con (A) el Pi extraído con NaOH y con (B) el P No Occ (modelo de Walker y Syers, 1976); y correlación del valor pH del suelo con (C) el Po obtenido de la extracción con NaOH y con (D) la fracción de Po(modelo de Walker y Syers, 1976) del horizonte Bw de las muestras que se conservaron a humedad de campo.	65
Figura 27.	Correlación de la fracción de P Occ (modelo de Walker y Syers, 1976) con: (A) Al de minerales de bajo orden estructural (Al o), (B) Al asociado a alofano (Al o- Al d) y (C) Al asociado arcillas en su etapa cristalina (Al o- Al p) en horizontes Bw de muestras húmedas.	66

Relación de Tablas

		Pág.
Tabla 1.	Métodos de fraccionamiento de P	24
Tabla 2.	Características de las muestras seleccionadas para realizar el fraccionamiento de P.	33
Tabla 3	Método de fraccionamiento de P	35
Tabla 4.	Estadísticos descriptivos de las diferencias en las determinaciones de P en los distintos extractos de las muestras de horizontes Ah.	42
Tabla 5.	Estadísticos descriptivos de las diferencias en las determinaciones de P en los distintos extractos de las muestras de horizontes Bw.	43
Tabla 6.	Proporciones (%) que se obtuvieron de la de suma de fracciones de las muestras húmedas, secas y quemadas en relación al P total.	57
Tabla 7.	Proporciones (%) que se obtuvieron de la de suma de fracciones de las muestras húmedas, secas y quemadas en relación al P total.	59
Tabla 8.	Datos de P disponible en la cronosecuencia de muestras tratadas de los horizontes Ah y Bw, y P Bray así como P contenido en alícuotas (hojas) de los árboles de las zonas estudiadas.	70

1. Resumen

El fósforo (P) es un macronutriente esencial para las plantas, pero su disponibilidad para éstas se ve afectada porque es relativamente inmóvil en los suelos. Particularmente en suelos de origen volcánico tiende a fijarse al ser adsorbido específicamente sobre superficies de minerales de bajo orden estructural o de óxidos de hierro y aluminio que se forman durante la pedogénesis. También es inmovilizado temporalmente cuando es incorporado a la materia orgánica del suelo. Tanto la desecación de la superficie del suelo como la quema de la materia orgánica humificada pueden movilizar las fracciones de P al desestabilizar o destruir a las fracciones minerales u orgánicas a las que se encuentra asociado. Depósitos de tefras frescas pueden aportar P o modificar su biodisponibilidad.

En este trabajo se realizó un fraccionamiento de P (fósforo orgánico (Po), fósforo no ocluido (P No Occ), fósforo de los minerales primarios (P Ca) y fósforo ocluido (P Occ)) por el método de Tiessen y Moir (1993) y Hedley (1982), en muestras pertenecientes a una cronosecuencia de suelos volcánicos del sector central de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) para determinar cómo evoluciona su disponibilidad a medida que transcurre el tiempo. Se analizaron muestras tanto a humedad de campo, como secadas al aire o calcinadas para evaluar el efecto de estos tratamientos sobre la movilidad del fósforo. Se estudiaron muestras de horizontes Ah y Bw provenientes de los siguientes sitios: tefras del Parícutín (0 años), Parícutín (60 años), Popocatepetl (1,000 años), Guespalapa (2,185 años), Tláloc (6,500 años), El Pelado (10,000 años), Las Trojes y Quinto Barrio (~100,000 años). La determinación de la concentración de P se llevó a cabo por Espectrometría de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES). Se hizo un análisis del P total por Fluorescencia de Rayos-X (FRX) de alícuotas independientes de las muestras para conocer la eficiencia de extracción del método. Los resultados se compararon con un modelo de evolución de las fracciones P en suelos establecido por Walker y Syres (1976).

La desecación de las muestras no influyó en la extracción de P, pero la quema de los suelos permitió que se extrajera mayor cantidad de éste, sobre todo del horizonte Ah. Las fracciones que aumentaron más correspondieron principalmente al P asociado tanto a la fracción disponible (P No Occ) como a la fracción mineral extractable con HCl entre los 1,000 y 10,000 años.

La fracción de P dominante en todas las muestras de la cronosecuencia, es la relacionada con minerales primarios tipo apatita (P Ca). La mayor disponibilidad de P

en la cronosecuencia se encuentra entre los 1,000 y 10,000 años. El P total de las muestras disminuyó a lo largo de la cronosecuencia, como lo plantea el modelo de Walker y Syers (1976), y también se observó un incremento del P orgánico así como del P ocluido con el tiempo. Sin embargo, el método de fraccionamiento sólo logró extraer 39% del P total en muestras de edades intermedias a avanzadas, y no extrajo prácticamente el P contenido en las tefras recientes ni en suelos muy jóvenes (muestras del Paricutín). Tampoco parece extraer exhaustivamente al P ocluido (P Occ) ni al P orgánico (Po), sobre todo de las muestras de los suelos más evolucionados de la cronosecuencia (Las Trojes y Quinto Barrio).

2. Summary

Phosphorous (P) is an essential macronutrient for plants; however it is relatively immobile in soils and therefore not very available to plants. Particularly in soils formed on volcanic ash, P tends to adsorb specifically on surfaces of short range order minerals or on iron and aluminum oxides as pedogenesis proceeds. It is also temporarily immobilized as it is incorporated into the soil organic matter. Drying of the soil surface as well as incineration of the soil organic matter by forest fires can mobilize P by destabilizing or destroying the mineral and organic soil fractions to which it is associated. Fresh tephra deposits may add P to soils or modify its bioavailability.

In this study we performed a P fractionation following the method proposed by Tiessen and Moir (1993) and by Hedley (1982) in soil samples that belong to a chronosequence of volcanic ash soils taken at different sites within the Transmexican Volcanic Belt in order to analyze how P availability changes in time. Additionally to the field moist samples we analyzed air dried and burned samples to test the effects of desiccation and of forest fires on the mobility of P. Samples of Ah and Bw horizons from the following sites were studied: tephtras of Paricutín (0 years), Paricutín (60 years), Popocatepetl (1,000 years), Guespalapa (2,185 years), Tlálóc (6,500 years), Pelado (10,000 years), Las Trojes and Quinto Barrio (~100,000 years). In extract aliquots of the different fractionation steps (organic P (Po), non occluded P (P No Occ), calcium phosphates (P Ca), and occluded P (Pocc)). P was determined by Inductive Coupled Plasma Emission Spectroscopy (ICP- OES). On separate sample aliquots total P contents were determined by X-ray Fluorescence (FRX). The obtained results were

compared with the model of evolution of P fractions in soils proposed by Walker and Syres (1976).

Air drying did not affect the P fractionation, but larger amounts of P were extracted from burned samples, especially in the available fractions (P No Occ) and in the mineral fractions extractable with HCl 1M in samples of ages between 1,000 and 10,000 years.

The dominant P fraction in all samples of the chronosequence was the one associated to Ca-phosphates like apatite (P Ca). The largest amounts of plant available P were measured in samples from sites that are 1,000 to 10,000 years old. The total P content in the soils decreases with age along the chronosequence, following the model proposed by Walker and Syres (1976). Also the organic and the occluded P fractions increase with time. However, the fractionation procedure only extracts up to 39% of the total P contained in samples of intermediate to old aged sites, and it practically fails to extract P of recent tephra and of young soil samples (Paricutin soil). It also does not seem to extract all of the occluded (P Occ) and all of the organic P (Po), particularly in the most developed soils of the chronosequence (Las Trojes and Quinto Barrio).

3. Introducción

La disminución en la cobertura vegetal motivada por la deforestación y el cambio de uso del suelo, los incendios forestales y/o la erosión de los suelos con el paso del tiempo provoca la disminución de elementos nutritivos para la vegetación, lo cual a su vez dificulta las labores de reforestación de sitios degradados. México ha perdido más de la mitad de la superficie cubierta originalmente con bosques templados, esto es, alrededor de 50 millones de hectáreas (CONAFOR, 2006). Una proporción importante de los bosques templados de México se encuentran en la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), en cuyos suelos presumiblemente el fósforo es el nutrimento que limita al crecimiento de los árboles.

La FVTM es una provincia geológica de 80 a 230 km de ancho y aproximadamente 1000 km de longitud, que se extiende desde las costas del Pacífico, en Jalisco, hasta las costas del Golfo de México en Veracruz (Ortega, *et al.*, 2008; Demant, 1978). Sus coordenadas extremas son: al norte $21^{\circ}38'24''$, al sur $18^{\circ}23'24''$, al este $-96^{\circ}22'12''$ y al oeste $-105^{\circ}45'$. Muestra complejos de arcos volcánicos continentales (Szykaruk *et al.*, 2004), los cuales se asocian a la subducción de las Placas de Cocos y de Rivera, a lo largo de la Trinchera Centroamericana. Se divide en tres sectores o porciones con base en su geología y tectónica (Demant, 1978; Pasquaré *et al.*, 1991) (Figura 1): occidental, central y oriental. Su vulcanismo presenta edades que van del Plio-Pleistoceno al periodo Reciente (Pasquaré *et al.*, 1991).

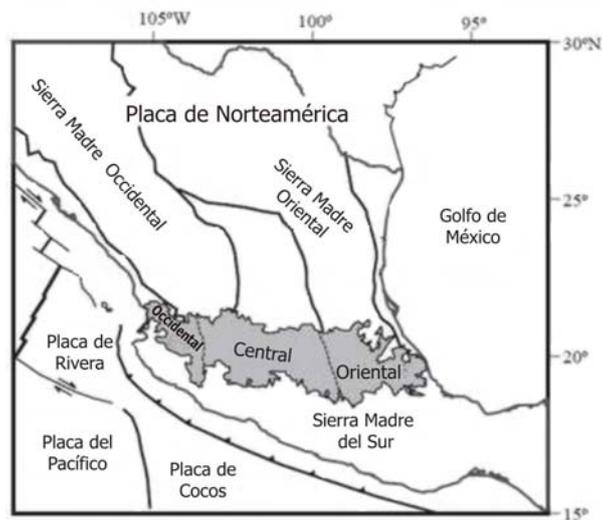


Figura 1. Provincias geológicas de México, en la parte central la Faja Volcánica Transmexicana (en gris) y los sectores en que se divide. (Demant, 1978; Pasquaré *et al.*, 1991).

El sector central de la FVTM está dominado por bosques de *Pinus* y *Abies*. Los suelos presentan edades de 60 a cientos de miles de años y son el producto del intemperismo de tefras (Peña y Zebrowski, 1992). En altitudes entre 2,000 y 2,600 m predominan los suelos de tipo Cambisol, Lixisol, Phaeozem y Vertisol, mientras que en altitudes mayores a los 2800 m dominan los de tipo Andosol, los cuales están asociados con suelos de tipo Leptosol, y Regosol en función de la edad de la superficie (Miehlich, 1991; Peña y Zebrowski, 1992; Werner, 1978; Semarnat, 2002). Los Leptosoles y Regosoles dominan en superficies jóvenes y generalmente no presentan una buena calidad de sitio, pero conforme éstos evolucionan a Andosoles la profundidad fisiológica, la capacidad de retención de agua y el contenido de materia orgánica, mejoran, convirtiéndolos en sitios altamente productivos. No obstante el P disponible se puede convertir en un factor limitante para el crecimiento de los árboles en el transcurso del tiempo (Peña y Siebe, 2005).

Lo anterior se debe a que los Andosoles tienen una alta capacidad para adsorber fosfatos dado que contienen compuestos con aluminio (Al) y hierro (Fe) activo. Esto da como resultado una deficiencia de P disponible para las plantas (Shoji *et al.*, 1993). Varios autores reportan una disponibilidad de fósforo (P) relativamente alta en suelos de origen volcánico jóvenes (<1,000 años), correspondientes a Regosoles o Andosoles vítricos (Shoji *et al.*, 1993; Siebe *et al.*, 2003), pero deficiencias de P en suelos Andosoles sílicos o alúmicos. En 1976 Walker y Syers propusieron un modelo de evolución de las fracciones de P con base en un estudio de suelos de Nueva Zelanda de diferente grado de desarrollo. En este modelo ellos plantean que el P total del suelo disminuye con el tiempo y además, describen que el P se asocia preferentemente a la materia orgánica en las fases intermedias de desarrollo del suelo. De acuerdo a este modelo, el P se encuentra disponible para las plantas en cantidades suficientes sólo en las etapas tempranas a intermedias de evolución, mientras que en estados avanzados de desarrollo queda ocluido dentro de neoformaciones minerales como los óxidos de hierro y aluminio.

Se han reportado varios métodos para fraccionar al P del suelo (Chang y Jackson, 1957; Williams *et al.*, 1967; Hedley, 1982; Tiessen y Moir, 1993). Sin embargo, la eficiencia y la especificidad de las soluciones extractoras utilizadas en cada uno de ellos es ampliamente discutida (Miehlich, 1991; Johnson *et al.*, 2003) y aún requiere de verificación y validación.

Recientemente el grupo del Tree Ring Laboratory de Arizona hizo estudios dendrocronológicos en la zona aledaña al volcán Parícutín y observó un incremento drástico de la concentración de P en los anillos de crecimiento de árboles de pino que correlacionan con la erupción del volcán Parícutín (Michael Ort, 2007, Comunicación personal). El grupo del Tree Ring Laboratory postula que o bien las tefras del Parícutín contenían P en formas muy solubles, o provocaron un efecto alcalino en los suelos, el cual movilizó P, o que las quemaduras por incendios forestales de la cobertura vegetal asociadas a la erupción movilizaron el P contenido en el mantillo y en la materia orgánica humificada de los suelos.

En el presente trabajo se realizó un fraccionamiento de P en muestras de una cronosecuencia de suelos volcánicos en la FVTM, con el propósito de tener un mejor entendimiento del comportamiento del P, tanto de sus fracciones inorgánicas como de sus fracciones orgánicas, y particularmente de sus fracciones biodisponibles. Además se investigó el efecto que pudiera tener el depósito de tefras frescas, los incendios o la desecación sobre la disponibilidad de P en estos suelos. El fraccionamiento se realizó según el método de Tiessen y Moir (1993) y el de Hedley (1982). Para verificar la eficiencia de la extracción se analizó en alícuotas separadas de las muestras el contenido de P total por fluorescencia de rayos X (FRX), y para verificar la selectividad de las soluciones extractoras se realizaron análisis de correlación entre los contenidos de P extraídos con cada solución y los contenidos de los diferentes componentes del suelo a los cuales el P supuestamente se encuentra asociado.

Para el estudio se utilizaron tefras del Parícutín tomadas durante la erupción, proporcionadas por el Instituto Smithsonian, para iniciar la cronosecuencia en el tiempo cero y para evaluar la disponibilidad del P en estos materiales, así como muestras del suelo actual desarrollado sobre cenizas del Parícutín (60 años después de la erupción) (Siebe *et al.*, 2003) y muestras de suelos volcánicos con edades entre 1,000-100,000 años de los sitios Popocatepetl (Edad 1000 años), de la Sierra del Chichinautzin: Guespalapa (Edad 2,185 años), Tláloc (Edad 6,500 años), El Pelado (Edad 10,000 años) (Peña y Siebe, 2005), así como de la Sierra Monte Alto/Monte Bajo: Las Trojes y Quinto Barrio con ~100,000 años de edad (Peña, tesis en proceso). Una alícuota de las muestras se analizó a humedad de campo, mientras que otras dos alícuotas se secaron al aire o se calcinaron en una mufla para investigar el efecto de la desecación y la quema del suelo sobre la disponibilidad del P, respectivamente.

4. Antecedentes

El P es un elemento reactivo que se estabiliza principalmente en forma de fosfato y forma la base de un gran número de compuestos orgánicos como el adenosin trifosfato (ATP) y compuestos inorgánicos como la apatita ($\text{Ca}(\text{PO}_4)_3\text{Cl, F, OH}$). En todas las formas de vida el P desempeña un papel esencial en los procesos de almacenamiento y transferencia de energía, como el metabolismo, la fotosíntesis, la función nerviosa y la acción muscular, lo que hace de él un elemento determinante para el crecimiento y desarrollo de plantas y animales. Por esta razón ha existido un profundo interés en estudiar las propiedades y el comportamiento del P y sus implicaciones ecológicas, agropecuarias, económicas y culturales, como por ejemplo en los estudios arqueológicos para conocer los desplazamientos de los antiguos pueblos.

El P forma parte de la composición de las rocas y los minerales del suelo. Muchos de estos minerales primarios presentan una baja solubilidad por lo que el P está poco disponible para las plantas. Esto ha llevado a los agricultores a utilizar fertilizantes minerales que se extraen de los grandes yacimientos de roca fosfórica y fertilizantes orgánicos obtenidos de residuos vegetales y animales, para con estos reemplazar el P que extraen del suelo los cultivos. Una amenaza para esta práctica es que las minas económicamente explotables, que contienen este elemento, presentan síntomas de agotamiento.

4.1. El P en las plantas

El P inmediatamente disponible para las plantas es el que se encuentra en la solución del suelo en forma de iones H_2PO_4^- o HPO_4^{2-} (Figura 2). Es absorbido por las plantas a través de las raíces y distribuido a partir de éstas a todos los demás órganos de la planta. La concentración del P en las plantas varía entre 0.1 y 0.5%, y es considerada baja en comparación con la de otros elementos esenciales como el nitrógeno (N) y el potasio (K) (Havlin, 1999).

La función principal del P en las plantas es el almacenamiento y la transferencia de energía. La energía de los carbohidratos obtenida en la fotosíntesis y el metabolismo es almacenada en compuestos de fosfato (ATP o ADP). Cuando la molécula terminal de P de cada ATP o ADP es desdoblada, se libera una cantidad relativa de energía (12,000 cal/mol). Esta energía es utilizada en los procesos de crecimiento y reproducción. El P también es un componente estructural de los ácidos nucleicos, las coenzimas, los nucleótidos, las fosfoproteínas, los fosfolípidos y los fosfatos de azúcares.

Las plantas absorben la mayor cantidad de P durante el proceso de crecimiento. En la maduración el P se desplaza hasta las semillas (Khoury, 2005). El P es un componente esencial del material genético del núcleo celular; la división y el crecimiento celular dependen de

adecuadas cantidades de P. Éste a su vez está concentrado en las células que se dividen rápidamente, provocando el crecimiento de raíces y tallos.

La insuficiencia de P en la planta se manifiesta en la disminución del crecimiento de la misma y en el retraso de la maduración de los frutos. La falta de P dificulta también los procesos metabólicos como la conversión del azúcar en almidón y celulosa. De ello resulta un aumento de la concentración de azúcar que conduce a la formación de antocianinas, que se manifiestan como manchas o bandas púrpuras en tallos y hojas de las plantas (Khoury, 2005).

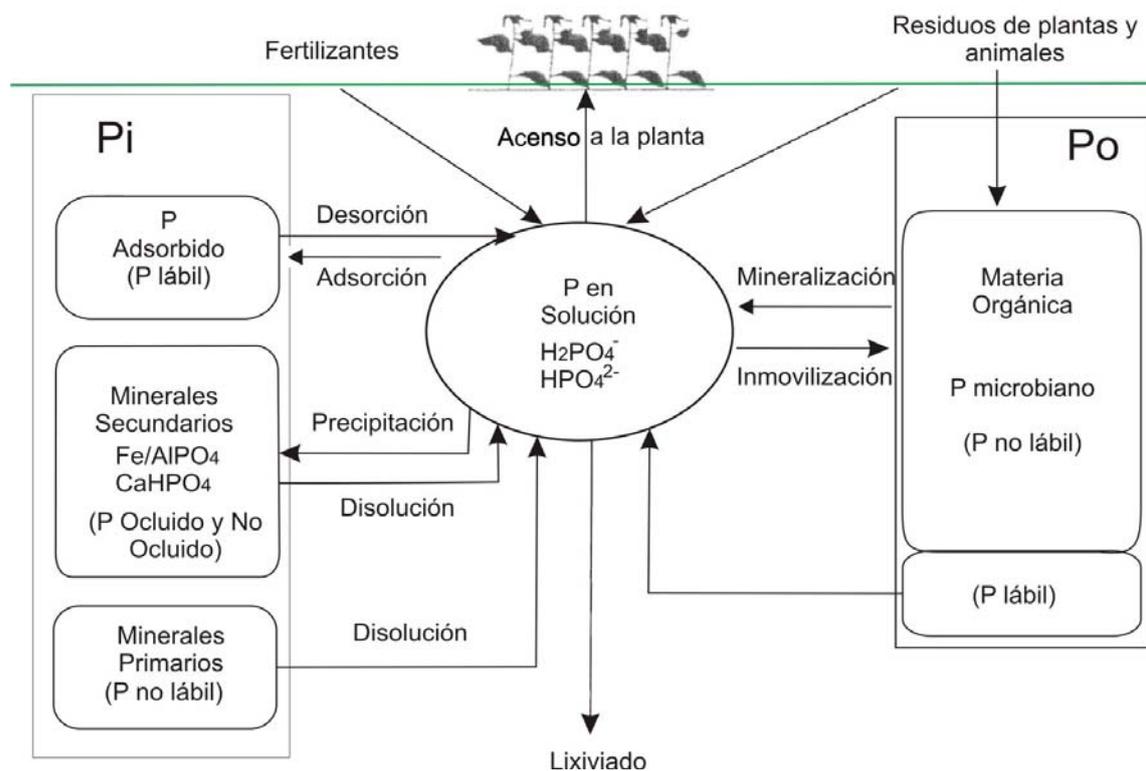
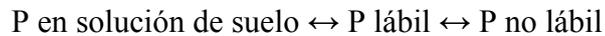


Figura 2. Ciclo del P (Havlin, 1999).

4.2. El P en el suelo

En el suelo, el P se encuentra como P orgánico (Po) y como P inorgánico (Pi) (Figura 2). Las fracciones del Po están ligadas a la materia orgánica formando parte de los compuestos húmicos (P recalcitrante) o bien de la biomasa microbiana (P lábil). Las fracciones del Pi forman parte de los minerales primarios del material parental, como por ejemplo la apatita ($Ca(PO_4)_3Cl, F, OH$), o se encuentran asociadas a minerales secundarios como lo son las arcillas minerales, por ejemplo el alofano y la imogolita, o los óxidos de Fe y Al. En estos últimos el P puede encontrarse ocluido dentro de nódulos o concreciones, o adsorbido específicamente a sus superficies.

Los mecanismos que rigen el comportamiento del P entre el suelo y la vegetación se describen en el CICLO DEL P que puede resumirse en forma simplificada con la siguiente relación:



La concentración de P en la solución de suelo disminuye por la absorción a través las raíces de las plantas, pero simultáneamente es reabastecida por las reservas de P lábil tanto de origen orgánico como inorgánico de los suelos. Los minerales primarios y secundarios que contienen P son disueltos para pasar a la forma lábil y después reabastecer a la solución en forma de H_2PO_4^- / HPO_4^{2-} . El P inorgánico adsorbido a superficies de arcilla en forma de H_2PO_4^- o HPO_4^{2-} (P inorgánico lábil) puede también ser desorbido y pasar a la solución del suelo. A su vez, el P en solución puede ser adsorbido a las superficies minerales de los coloides o precipitarse como P de minerales secundarios.

Los numerosos microorganismos (hongos y bacterias) dedicados a la descomposición y transformación de los residuos de las plantas también contienen P y constituyen por lo tanto compuestos de Po, que serán mineralizados al morir. Estos microorganismos son un reservorio de P potencialmente movilizable, que puede reabastecer en tiempos cortos a la solución del suelo, dada la gran dinámica de las poblaciones microbianas en los suelos (Havlin, 1999).

Los microorganismos del suelo inmovilizan el P en solución en forma de P microbiano, eventualmente produciendo compuestos de P mineralizables (Po lábil), o incluso compuestos de P orgánico más resistentes a la degradación microbiana (Po no lábil) (Havlin, 1999).

Por otro lado, el P puede perderse por escorrentía, lixiviación y por erosión. Debido a que el agua que corre sobre las rocas las erosiona y va arrastrando gran variedad de minerales para llegar a los depósitos marinos a través de diferentes procesos geológicos. Entre estos minerales los más abundantes son aquellos que contienen fosfatos, los cuales por ser un tanto insolubles, no cuentan con un mecanismo rápido para regresar e incorporarse a la tierra. Son éstos los que pueden constituir la materia prima para la elaboración industrial del fertilizante fosfatado que de esta forma vuelve de nuevo al suelo. El ciclo del P no es del todo equilibrado pues los fosfatos son llevados al fondo del océano más rápidamente de lo que se puede devolver. El trabajo de retorno del fosfato lo realizan las aves marinas y peces. Estos al ser consumidos por humanos y otros animales, posibilitan (al ser desechado) que se recobre parte del P presente en el mar. También se recupera por el guano depositado, el cual contiene grandes cantidades de fósforo.

Normalmente, en los ecosistemas alterados por el hombre, las pérdidas por erosión y extracción por cultivos pueden ser importantes. En términos generales la cantidad de P total del suelo va disminuyendo gradualmente con el tiempo, a medida que las pérdidas del sistema no se ven compensadas por adiciones.

4.2.1 El P orgánico en suelos

El P se encuentra formando compuestos orgánicos con lípidos, proteínas y glúcidos. La cantidad de P orgánico en suelos generalmente aumenta con el incremento de carbono (C) orgánico y N. Los suelos tienden a ser caracterizados por una relación C/N/P/S que en promedio, en suelos, es 140:10:1.3:1.3 (Havlin, 1999).

Dentro de los compuestos de P orgánico que se han estudiado en los suelos se encuentran:

Inositol fosfato	10-50 %
Fosfolípidos	1-5 %
Ácidos nucleicos	0.2-2.5 %

Los fosfatos de inositol constituyen el mayor grupo de compuestos orgánicos de P en el suelo. Estos compuestos contienen, aproximadamente, una tercera parte del P orgánico. Las cantidades de P orgánico varían entre el 3 y el 75 % del P total, dependiendo del contenido de materia orgánica (MO) en los suelos. De este porcentaje, sólo se conocen alrededor del 50% de los compuestos (Havlin, 1999).

El inositol fosfato (Figura 3) representa una serie de ésteres de fosfato, el ácido fítico (mioinositol hexafosfato) tiene seis grupos ortofosfatos (H_2PO_4^-) unido a cada átomo de carbono de benceno. El inositol hexafosfato es el éster fosfato más común y comprende más del 50 % del P orgánico total en suelos. Éste es producido por la actividad microbiana y la degradación de residuos de plantas.

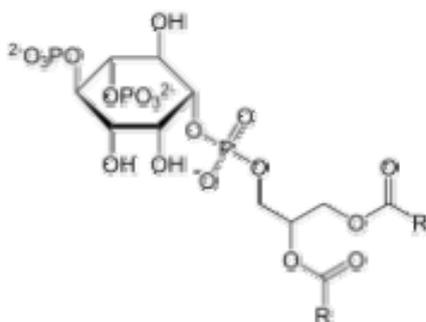


Figura 3. Estructura del inositol fosfato.

Los ácidos nucleicos (ADN y ARN) son producidos durante la descomposición de residuos por los microorganismos del suelo. Los compuestos de P orgánico en suelos llamados fosfolípidos son insolubles en agua, pero son utilizados y sintetizados por los microorganismos

de los suelos. Dentro de los fosfolípidos el glicerol se considera de los más comunes (Havlin, 1999).

En general, los procesos de reacción (mineralización e inmovilización) del P ocurren simultáneamente en suelos como lo muestra la reacción:



El P orgánico en suelos se origina de los residuos animales y vegetales, los cuales son degradados por los microorganismos para producir otros compuestos orgánicos que son mineralizados para pasar de Po a Pi. Parte del P orgánico que se resiste a la degradación microbiana; está más asociado a los ácidos húmicos. El inositol fosfato, los ácidos nucleicos y los fosfolípidos pueden también ser mineralizados en los suelos por una reacción catalizada por la enzima fosfatasa (Havlin, 1999).



Esta enzima juega un papel importante en la mineralización del P orgánico en los suelos. La actividad de la fosfatasa en los suelos aumenta con el incremento de la materia orgánica que contiene el C, pero también es afectada por el pH, la humedad, la temperatura y otros factores. La mineralización del P orgánico puede ser dependiente de la estación del año. Existe un decremento durante el ciclo vegetativo de la planta y un aumento nuevamente cuando se levanta la cosecha (Havlin, 1999).

Las mediciones del P orgánico en suelos se dificultan más que para el N porque el P inorgánico producido, a través de la mineralización, puede ser removido de la solución del suelo por su adsorción a las arcillas y por su precipitación en forma de fosfatos de Al^{3+} , Fe^{3+} o Ca^{2+} .

4.2.2 El P inorgánico en suelos

El P en solución que no es absorbido por las raíces de las plantas o inmovilizado por los microorganismos puede ser adsorbido a las superficies de los minerales (P lábil) o puede ser precipitado como minerales secundarios de P. La adsorción superficial y las reacciones de precipitación constituyen conjuntamente la retención o fijación del P, la cual se lleva a cabo por diferentes mecanismos (Brady, 1996) (Figura 4):

1) *Reacciones de precipitación*. Con los iones H_2PO_4^- que se encuentran en solución, se forma un precipitado con óxidos o hidróxidos de Al^{3+} , Fe^{3+} , Mn^{3+} . Son relativamente disponibles para las plantas antes de su formación, pero con paso del tiempo se reduce esa disponibilidad.

2) *Reacciones de intercambio aniónico*. El anión H_2PO_4^- puede atraer cargas positivas que se desarrollan bajo condiciones ácidas de la superficie esférica de los bordes fracturados de las arcillas con carga variable tipo caolinita (1:1). Los iones H_2PO_4^- adsorbidos forman complejos en el exterior de la esfera y están sujetos a un intercambio con otros aniones, como OH^- , SO_4^{2-} , MoO_4^{2-} , o ácidos orgánicos (R-COO^-). Debido a que la reacción que se produce es reversible, la adsorción del H_2PO_4^- va a estar limitada por la capacidad del suelo para incrementar los iones hidroxilo o la adición de materia orgánica que incrementan los ácidos orgánicos (como aniones) capaz de sustituir al H_2PO_4^- .

3) *Reacciones superficiales con óxidos de Al y Fe (inter-esfera)*. El anión H_2PO_4^- puede también sustituir a los grupos hidroxilo que se encuentran en el interior de la estructura esférica de la arcilla para formar un complejo. Cuando el fosfato es unido a través de un enlace Al-O-P, el H_2PO_4^- es considerado *lábil* y puede realmente ser desorbido por la superficie mineral del suelo en solución.

4) *Formación estable de un puente binuclear (inter-esfera)*. La disponibilidad de los iones H_2PO_4^- permite que exista una segunda sustitución de un hidroxilo, de tal forma que el ión fosfato es enlazado a dos átomos de Al (o de Fe) adyacentes a la superficie del óxido hidratado. Con esto, el fosfato pasa a ser una parte integral de los óxidos minerales, lo que disminuye la posibilidad de que se vuelva a solubilizar en el suelo. Consecuentemente, la desorción es más difícil y el H_2PO_4^- es considerado como *P no lábil (no ocluido)*.

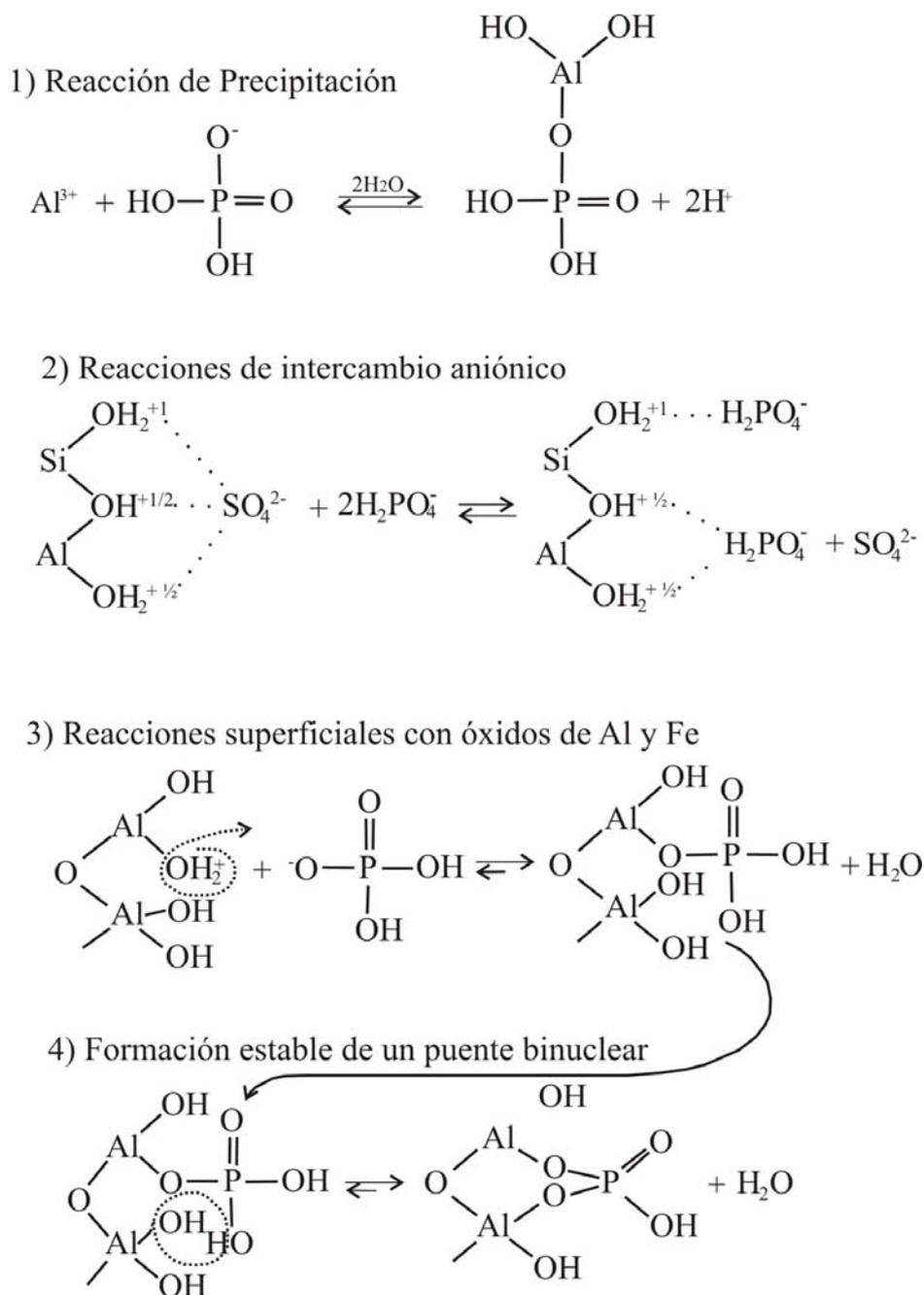


Figura 4. Mecanismos de retención de P en el suelo (Brady, 1996).

A medida que aumenta el tiempo, se genera una precipitación adicional de óxidos de Fe o Al que va a *ocluir* al fosfato al interior y con ello se genera un impedimento para que el fosfato se tenga en forma soluble para la mayoría de los suelos de tipo ácido.

En suelos calcáreos, pequeñas cantidades de fosfatos pueden ser adsorbidos a través de la sustitución del anión CO_3^- de la superficie del CaCO_3 . Cuando se tiene P en bajas concentraciones, la superficie de adsorción predomina, pero en altas concentraciones de P, precipitan minerales de Ca-P sobre la superficie de CaCO_3 . Otros minerales, como $\text{Al}(\text{OH})_3$ y $\text{Fe}(\text{OH})_3$, también contribuyen a la adsorción del P en solución de los suelos calcáreos.

La fijación va a depender principalmente del pH. En suelos ácidos, el P inorgánico precipita con minerales secundarios de Fe/Al-P (en sus formas ocluida y no ocluida) y /o es adsorbido en la superficie de óxidos de Fe/Al y minerales de arcillas. En suelos neutros y calcáreos, el P inorgánico precipita con minerales secundarios de Ca-P y /o es adsorbido en la superficie de las arcillas minerales y CaCO_3 .

La retención del P es una secuencia continua de precipitación y adsorción. Con concentraciones bajas de P en solución, la adsorción probablemente domina sobre las reacciones de precipitación. Estas últimas proceden cuando la concentración de P, asociada a otros cationes en la solución del suelo, excede del producto de solubilidad (K_{ps}) del mineral. Cuando los fertilizantes solubles en agua son aplicados al suelo, la solubilidad de las concentraciones de P en suelo y los cationes acompañados es muy alta. En un comienzo, las reacciones de precipitación de P ocurren porque la concentración del P en solución acompañado de cationes, excede a la especie mineral solubilizada. Conforme disminuye la concentración de P en solución, la adsorción del P ocurre en sitios superficiales. Indiferente de la contribución relativa de reacciones de adsorción y precipitación, se sobreentiende que los procesos de fijación de P son importantes para la nutrición del P y el manejo eficiente de P fertilizado.

La reserva más importante dentro de los minerales primarios de Pi en los suelos, es el mineral apatita (fosfato de calcio) en sus formas de cloroapatita, fluoroapatita e hidroxiapatita ($\text{Ca}(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$, F, OH). Este mineral se presenta en forma de pequeños cristales dispersos en la mayoría de las rocas ígneas y en los suelos que no están muy meteorizados, observándose fácilmente en la fracción arena fina. En el curso de la pedogénesis va lentamente desapareciendo de los horizontes superiores del suelo. Por la relativa insolubilidad de este mineral primario y su forma de presentarse, no se puede considerar como una fuente directa para las plantas, sino más bien como una reserva movilizable a mediano y largo plazo.

Parte de los compuestos inorgánicos de P son minerales derivados de las reacciones de los fertilizantes artificiales con los componentes del suelo, como la variscita (fosfato de Al), la estregolita (fosfato de hierro) y la brucita (fosfato de calcio).

4.3. Factores y procesos que influyen en la movilidad del P en el suelo

En la solución del suelo el P está presente en gran parte como ión ortofosfato en sus diferentes especies (H_2PO_4^- y HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}) muy frecuentemente del orden de 0.1mg/L (Khouri, 2005).

El P como otros elementos esenciales está asociado a diferentes factores condicionantes que van a intervenir en la disponibilidad del mismo para las plantas o la retención al suelo. Entre los factores que más influyen en su disponibilidad están el pH, la humedad, la temperatura, los incendios o quemas y el tiempo.

Influencia del pH

El predominio de una u otra especie (H_2PO_4^- y HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}) del ión ortofosfato depende del pH (Figura 5). A pH de 7.2 están en equilibrio las especies iónicas H_2PO_4^- y HPO_4^{2-} . Algunas plantas pueden utilizar, o incluso requerir, cierta cantidad de la especie HPO_4^{2-} , pero H_2PO_4^- es la forma que es absorbida con mayor rapidez por las plantas. La importancia del ión HPO_4^{2-} aumenta a valores de pH elevados. El ión PO_4^{3-} , dado que aparece a pH muy elevado, no puede considerarse significativo para la nutrición de las plantas. La concentración de P en solución requerida por plantas varía de 0.003 a 0.3 ppm (Havlin, 1999) y va a depender de la especie y su rendimiento.

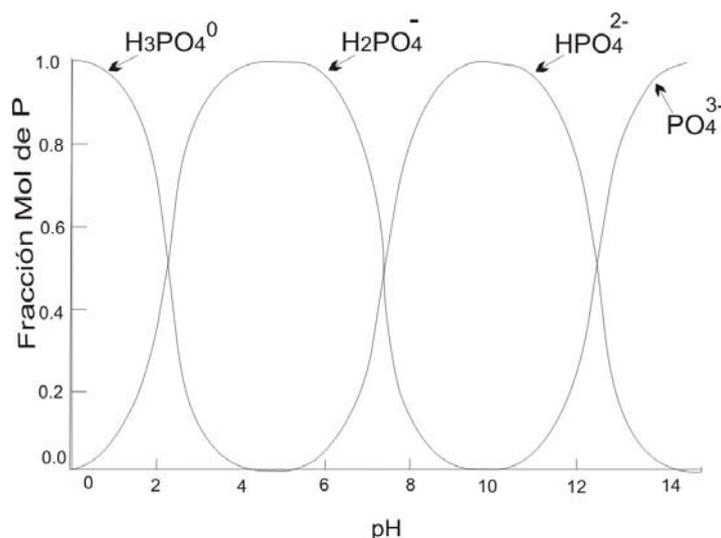


Figura 5. Relación entre las diferentes especies de P en solución y el pH del suelo (Havlin, 1999).

El ciclo del P nos ilustra que los niveles de P en solución están limitados por la relación del P adsorbido a la superficie mineral, la mineralización del P orgánico, y la disolución de los minerales de P sólido.

La concentración de P en solución es controlada por la solubilidad de los minerales de P inorgánico en suelos o dicho de otro modo del producto de solubilidad de cada mineral.

Los minerales de P más comunes encontrados en suelos ácidos son los asociados a Fe y a Al mientras que los minerales asociados a Ca predominan en suelos neutros y calcáreos (Figura 6).

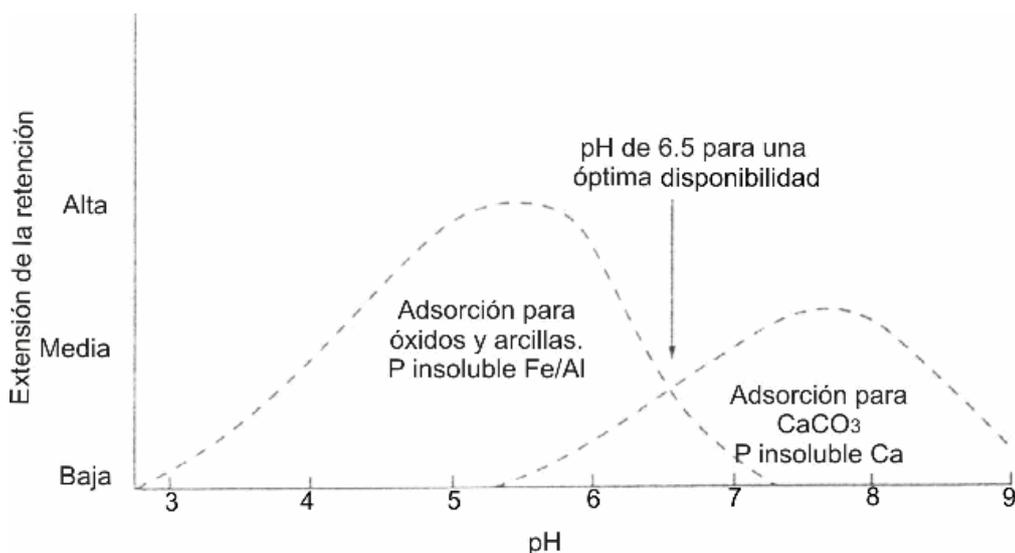


Figura 6. Minerales predominantes en función del pH (Havlin, 1999).

A pH de 4.5 los compuestos $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Varicita) y $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Strengita) controlan la concentración de H_2PO_4^- en solución. Al aumentar el pH incrementa la concentración de esta especie. Minerales como la hidroxiapatita $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ y fluoroapatita $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ también muestran alta solubilidad a pH bajos.

Entre 6 y 6.5, los minerales de Al-P y Fe-P pueden coexistir con el β - fosfato tricalcio (β -TCP), fosfato de octacalcio (OCP), fosfato de dicalcio (DCP), y dihidrato fosfato de dicalcio (DCPD).

En la disolución de los minerales de Ca-P es más difícil que se libere la especie H_2PO_4^- , como en el caso de la relación a los minerales de Al y Fe, pues al aumentar el pH, la concentración del H_2PO_4^- decrece dado que precipita Ca-P.

Después de pH 7.2 la especie dominante en solución es HPO_4^{2-} donde existe una competencia de esta especie con el CaCO_3 en solución, el cual se precipita cuando alcanza el pH de 7.8 y la disponibilidad del P para las plantas decrece.

Por lo tanto, los fosfatos de calcio permanecen insolubles en condiciones alcalinas y los de Fe y Al permanecen insolubles en condiciones ácidas. El pH más favorable para la disponibilidad del P se encuentra por debajo de la neutralidad (pH 6-6.5).

Los complejos solubles formados por los iones fosfato con distintos cationes di y trivalentes tales como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , etc., que suelen estar presentes en la solución del suelo, pueden llegar a ser una fracción importante del ión ortofosfato en solución. También los complejos solubles de P orgánico forman parte del P total en la solución.

Para el caso de las fracciones de P orgánico, el pH tiene una influencia relacionada con el grupo OH⁻ que compite con los sitios enlazantes de las especies H₂PO₄⁻ y HPO₄²⁻, por la gran actividad microbiana a niveles de pH neutro, y al incrementarse la precipitación de minerales de Ca-P a niveles de pH arriba de 7.

Influencia de la quema

El fuego influye en el valor nutricional de las plantas, incrementando la concentración del N y la digestibilidad *in vitro* del material seco tanto en los bosques como en los campos. En ambos casos, la magnitud del efecto de la quema, disminuye con el avance de la estación de crecimiento. Después de la quema, la depositación de las cenizas promueve el retorno más rápido de los nutrientes Ca, Mg, P y K, los cuales presentan un aumento en su disponibilidad (Mataix, 1999; Raison, 1979; Khanna y Raison, 1986; Kutiel y Kutiel, 1989; Lynham *et al.*, 1998).

En los incendios forestales, el contenido de P disponible para las plantas en general aumenta debido a la transformación de Po a Pi para producir la solubilización del ácido fosfórico en el suelo (Kutiel y Shaviv, 1989; Saa *et al.*, 1993), y a la incorporación de cenizas producto de la combustión de la vegetación (Carreira y Niell, 1995). Este incremento de P en forma asimilable es el responsable de la fertilidad que presentan los suelos tras los incendios. En cuanto al P total los efectos son escasos, aunque existen estudios en los que han encontrado aumentos en el contenido de P total (Mataix, 1999).

En la agricultura la frecuencia y época de quema son factores determinantes en la recirculación de nutrientes Ca, Mg, P y K generando un aumento en su disponibilidad. En distintas regiones del mundo, las recomendaciones con respecto a frecuencias de quema son muy variadas, desde quemas anuales, bianuales, trianuales o cada cuatro años (Mataix, 1999), y están relacionadas con el material combustible acumulado y el régimen pluviométrico del área, para determinar la frecuencia de la misma.

Influencia de la temperatura

Generalmente la adsorción del P aumenta con altas temperaturas en los suelos así como con la altitud a la que se localizan (Campo, 2003). La adsorción del P en suelos de regiones calidas es generalmente mayor que en suelos de regiones templadas (Havlin, 1999). Los suelos en regiones húmedas y cálidas también vienen acompañados de altos contenidos de óxidos de Fe/Al. Con el aumento de la temperatura, se favorece el proceso de mineralización del P en la fracción que contiene la materia orgánica (MO), así como de los residuos que se produzcan en el campo.

La adsorción de P en suelos es un fenómeno que se da en dos etapas: una reacción inicial rápida seguida de varias reacciones lentas. Las reacciones de adsorción que involucran intercambios de P por aniones en la superficie de óxidos de Fe/Al, son reacciones extremadamente rápidas. La segunda etapa involucra (1) formación de enlaces covalentes de Fe-P o Al-P en superficies con óxidos de Fe/Al y (2) la precipitación de un compuesto de P para el cual el producto de solubilidad se ha excedido. Estas reacciones envuelven una transición de enlaces débiles a enlace fuertes de P adsorbido, lo cual genera una pérdida de P para las plantas, que aumentará con el incremento de la temperatura.

Los compuestos iniciales que precipitan durante la reacción de P fertilizado en suelos, son relativamente inestables y cambiarán con el tiempo entre más estable menos soluble.

Influencia en el transcurso del tiempo

En 1976 Walker y Syers plantearon un modelo (Figura 7), donde mostraron que el P total del suelo disminuye con el tiempo y plantearon cuales eran las posibles fracciones a las que se asocia el P.

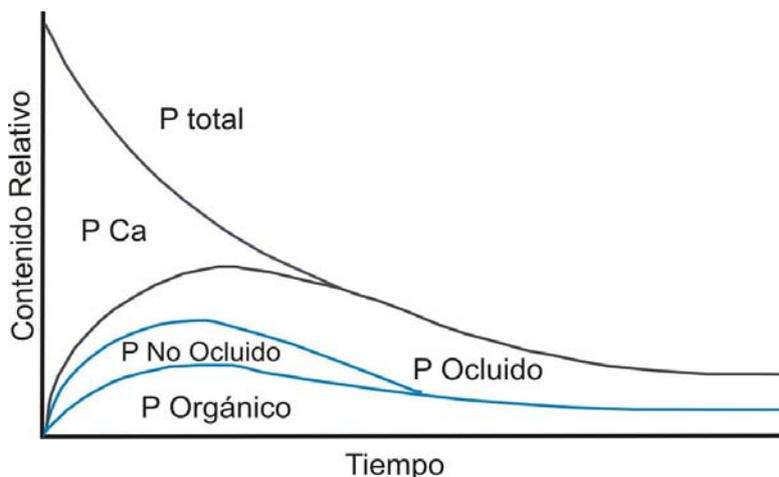


Figura 7. Modelo de Walker y Syers (1976).

Para llegar a este modelo, Walker y Syers (1976) desarrollaron un trabajo alrededor de un fraccionamiento de cuatro componentes, aplicado a 17 suelos de Nueva Zelanda con edades de 23,000, 70,000 y más de 100,000 años de edad. Walker y Syers concluyeron que la distribución de las fracciones de P en los horizontes minerales de los suelos de Nueva Zelanda, era un indicador que podría ser usado para determinar una edad aproximada del suelo con una precisión de 20,000 años aproximadamente.

En 2003 Johnson y colaboradores plantearon las siguientes observaciones para el uso del modelo de Walker y Syers (1976) con el fin de representar las tendencias de las formas más

lábil de P en los suelos, es decir, aquellas que están comúnmente disponibles para la vegetación forestal:

1. Walker y Syers, en su modelo no hacen distinción de las fracciones del Po, fundamental para conocer su importancia nutricional en muchos ecosistemas agrícolas y forestales.
2. En el modelo, el Po mineralizable no fue un término relevante ya que no se incluyó en la cronosecuencia. Walker y Syers excluyen de sus datos este término.
3. Las actividades o vías (como la Micorriza) que representan la disponibilidad del P para las plantas no están representadas por el modelo de Walker y Syers, ya que la relación que se tiene entre la edad de los suelos y las fracciones de P no fueron consideradas. En la actualidad estas vías son consideradas, sólo que no existe un método para cuantificarlas.
4. El modelo no incluye la relación entre el tipo de vegetación del sitio (Nueva Zelanda) y las fracciones de P, la cual permite conocer el efecto en la disponibilidad del P para la productividad forestal.

Todo ello nos lleva a pensar que el modelo de Walker y Syers puede ser utilizado para conocer las tendencias del P (Pi y Po) en los suelos a diferentes tiempos, mostrando la disponibilidad de éste en su fase inorgánica.

4.4. Métodos para analizar P en suelos (P disponible, fraccionamiento, P total)

Son varios los autores que han propuesto métodos para separar las diferentes fracciones en las que se encuentra el P en el suelo, tanto en su forma orgánica como inorgánica (Tabla 1). En general todos los autores han propuesto que la fracción orgánica sea obtenida por la diferencia entre el P total y el P inorgánico.

Todos estos métodos determinan al P por métodos colorimétricos como los métodos de Murphy - Riley (1962) y Olsen (1982) los cuales están basados en la formación de un complejo de fosfato con el molibdato de amonio de color azul en medio ácido para el primer caso o en medio básico para el segundo caso, donde la concentración se determina por espectrometría a >712 nm.

Tabla 1. Métodos de fraccionamiento de P

Autor y Año	Extractos	Fracciones	La mayor cantidad de fracción de P obtenida en g/m ²	Observaciones
Chang y Jackson (1957) Utilizado por Miehlich (1980)	NH ₄ Cl 1N	Pi disponible	n.d.	<ul style="list-style-type: none"> • P determinado colorimétricamente (complejo azul con molibdato de amonio) con espectrofotómetro (Jackson, 1957). • No se le da importancia al Po disponible.
	NH ₄ F 0.5N	Pi de Al	n.d.	
	NaOH 0.1N	Pi de Fe	n.d.	
	H ₂ SO ₄	Pi de Ca	n.d.	
	Citrato de Na/Ditionito de Na	Pi Occ de Fe	n.d.	
	NH ₄ F 0.5N	Pi Occ de Al	n.d.	
	Aparte de la secuencia fusión de Na ₂ CO ₃ /H ₂ O	P Total + Po	n.d.	

Williams y Walker (1969) Utilizado por Walker y Syers (1976)	HCl	P Ca	P No Occ= 46	<ul style="list-style-type: none"> • P determinado colorimétricamente (complejo azul con molibdato de amonio) con espectrofotómetro. • Profundidad de 64-75-100 cm.
	NH ₄ Cl	P No Occ		
	NH ₄ F	P No Occ	Po= 110	
	1ra NaOH	P No Occ	P Ca = 226	
	Reducto de P-soluble	P Occ		
	2da NaOH	P Occ		
	Residuo de Pi residual	P Occ	P Occ= 158	
Na ₂ CO ₃	P Total= Pi + Po			
Tiessen y Moir (1993) Hedley (1982)	Resina de Intercambio Iónico	Pi disponible	P No Occ=147 (Pi disponible+ Pi no ocluido)	<ul style="list-style-type: none"> • Determinación de P colorimétricamente por el método de Murphy-Riley (1962) con espectrofotómetro. • 20-60% de eficiencia
	NaHCO ₃ 0.5M	Pi disponible	Po = 313	
		Po disponible		
	NaOH 0.1M	Pi no ocluido	P Ca = 216	
		Po		
	HCl 1M	P Ca	P Occ= 69	
	HCl concentrado	Po recalcitrante		
Pi ocluido				
Digestión H ₂ SO ₄ conc/H ₂ O ₂	Pi ocluido			
Crews <i>et al.</i> (1995)	Resina de Intercambio Iónico	Pi disponible	P No Occ = 200 (Pi disponible+ Pi no ocluido)	<ul style="list-style-type: none"> • P determinado colorimétricamente por el método de Olsen (1982) con espectrofotómetro. • Profundidad de 50 cm.
	NaHCO ₃ 0.5M	Pi disponible	Po = 202	
		Po disponible		
	NaOH 0.1M	Pi no ocluido	P Ca = 400	
	Sonicar NaOH	Pi ocluido		
			Po recalcitrante	
	HCl 1M	P Ca	P Occ = 225	
HCl concentrado	Pi ocluido			
	Po recalcitrante			
Digestión H ₂ SO ₄ conc/H ₂ O ₂	Pi ocluido			

n. d. = No se determinó la cantidad de P, solo se reporta la concentración.

Estos métodos requieren de un ajuste del pH ya sea con H₂SO₄ o con NaOH a las condiciones de cada uno de ellos. La determinación colorimétrica presenta interferencias con la materia orgánica disuelta; su eliminación implica frecuentemente pérdida de muestra. Además el complejo azul del molibdato de P no es estable, lo cual implica que se tienen que controlar los tiempos entre su formación y su cuantificación (Etchevers *et al.*, 1984).

Otra opción que se tiene para determinar el P es por medio de Espectrometría de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente o ICP-OES (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer) (Solomon *et al.*, 2002; Kuo, 1996). En este método los átomos excitados o iones bajo alta temperatura (5000 a 8000 K) generados por la interacción de un campo magnético inducido con plasma Ar producen líneas de radiación características con intensidades en proporción a sus concentraciones que permiten que la muestra sea analizada sin ningún tratamiento previo. Es un método estable, reproducible y con un límite de detección bajo (0.05 ppm).

Para efectuar la determinación del P total algunos autores consideran la suma de las fracciones como tal (Crews *et al.*, 1995). Otros métodos realizan una digestión vía húmeda de una alícuota separada de la muestra, ya sea por medio de la fusión de Na₂CO₃ o la Fluorescencia de Rayos-X (FRX). Chang y Jackson (1957) hacen esto para obtener el P orgánico, el cual asumen que es la diferencia entre el P total y la suma de las fracciones obtenidas en el fraccionamiento que ellos proponen. Tiessen y Moir (1993) lo determinan para conocer la eficiencia que tiene el método de fraccionamiento que ellos proponen para extraer las distintas fracciones.

4.5. El P en suelos volcánicos

Las erupciones volcánicas que son ocasionadas por la disminución de la presión confinante del magma, llegan a la superficie en tres fases: líquida (lava), sólida (piroclastos) y gaseosa (vapor de agua, CO₂, SO₂, etc.). De la fase sólida son expulsados flujos piroclásticos, cenizas volcánicas, etc. Estas expulsiones volcánicas también llamadas tefras, contienen diversos silicatos y otros minerales de diferentes tamaños como son: vidrio volcánico, plagioclasa, cuarzo, piroxeno, hornblenda, biotita, olivino y otros. Además de estos minerales primarios, las tefras contienen minerales accesorios tales como apatita que contiene P.

Las tefras recientes contienen 0.004-0.6 g kg⁻¹ de P extractable en medio ácido (Shoji *et al.*, 1993). La apatita como mineral principal en las tefras juega un papel importante en la producción de cultivos sin fertilizar y es la responsable de la vegetación en zonas con abundante depositación de cenizas volcánicas (Nanzyo, 2002).

Después de la depositación de las tefras, inicia la formación del suelo, donde comienza a cambiar su composición mineral existiendo además un aporte de elementos nutricionales de las plantas que se encuentran en su entorno. Los suelos volcánicos comienzan a tener propiedades particulares, que dependerán de las condiciones ambientales (humedad, altura, vegetación, etc.), de la composición mineral (estructura, contenido de sales, pH), de factores antrópicos y del tiempo. Un ejemplo de ello es la evolución de los suelos volcánicos en una cronosecuencia bajo la influencia de la humedad (Figura 8), en la región de Lanzarote, España (Jahn y Stahr, 1996). En ella se observa que entre 1,000 y 10,000 años bajo condiciones de humedad alta se forman los Andosoles y que después de esa etapa evolutiva se forman los Acrisoles (> 100,000 años).

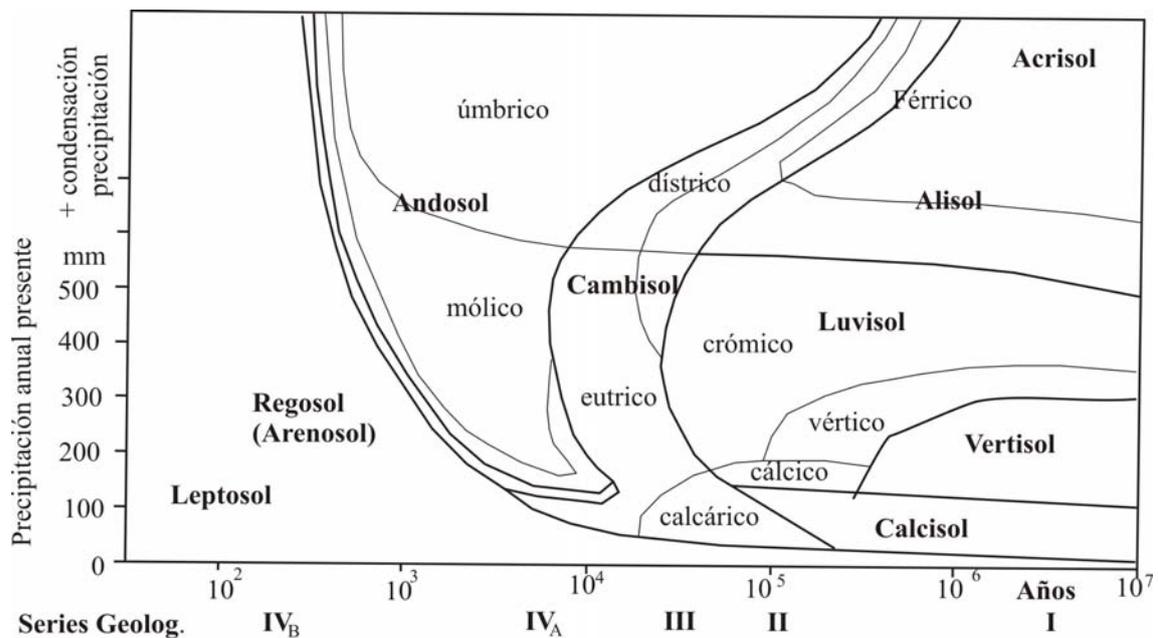


Figura 8. Evolución de suelos en función de la edad de la superficie y la precipitación en Lanzarote, España (Jahn y Stahr, 1996).

Las cenizas volcánicas al ser intemperizadas generan una neoformación de minerales secundarios, los cuales se forman a partir de las etapas que se describen a continuación (Figura 9):

1. Etapa *iónico- coloidal*. En esta etapa hay procesos de hidratación e hidrólisis de minerales primarios y posteriormente la liberación de bases y liberación de ácido sílico por lixiviación y, la liberación de cationes (Ca, Mg, K y Na) que se ve favorecida por la precipitación.
2. Etapa *no-cristalina*. Dependiendo de las condiciones de pH se forman minerales secundarios como por ejemplo: a $\text{pH} < 5$ se forma alofano y la ferrihidrita, y a $\text{pH} > 5$ se forman complejos órgano-minerales. El alofano es una arcilla de estructura esferoide donde pasan moléculas de agua y cationes como NH_4^+ o Ca^{2+} .
3. Etapa *paracristalina*. En esta etapa se forman minerales secundarios como la imogolita. La imogolita es un aluminio-silicato hidratado, con forma tubular que se forma por un proceso de deshidratación del mineral posterior a la etapa no cristalina.
4. Etapa *cristalina*. Al continuar el proceso de deshidratación con el paso del tiempo, se cristalizan minerales como la haloisita y la caolinita que se caracterizan por tener una estructura laminar con una composición de láminas de octaedros de Al y tetraedros de sílice 1:1.

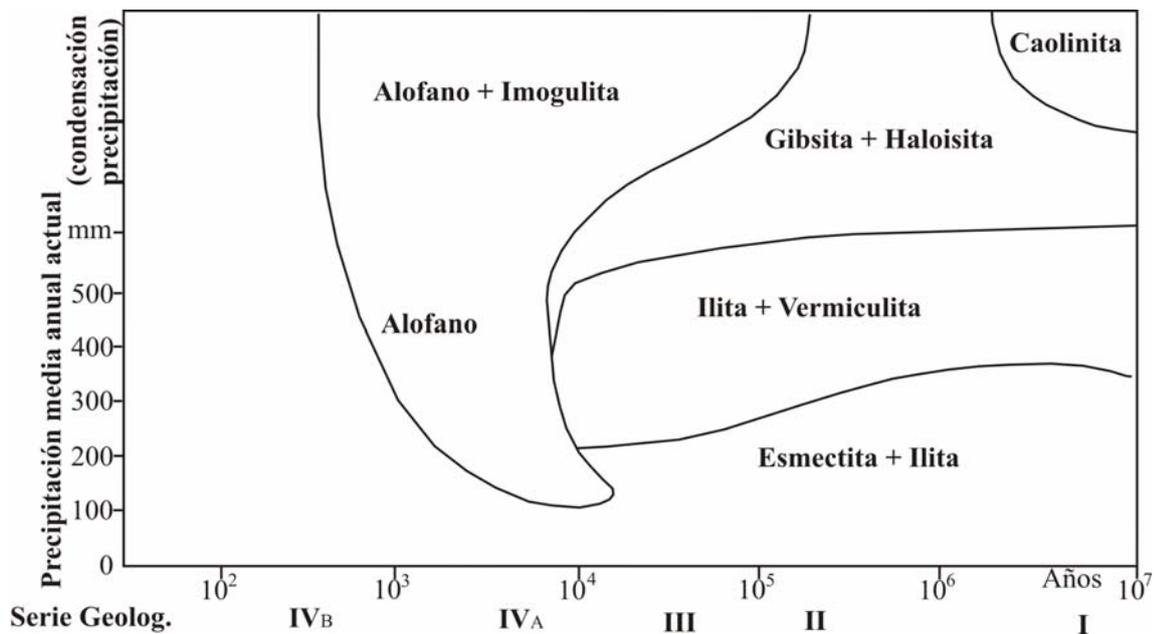


Figura 9. Formación de arcillas minerales en suelos volcánicos de las Islas Canarias en función de la precipitación media anual y la edad del material parental (Jahn y Stahr, 1996).

De acuerdo a la descripción anterior, los suelos de origen volcánico pueden tener diferente mineralogía, dependiendo de las condiciones ambientales y la edad de evolución.

Entre las etapas antes mencionadas se encuentra la formación de alofano, imogolita ya descritos, así como los complejos de Al-humus. Todas estas neoformaciones presentan propiedades particulares tales como la carga variable. La carga variable está constituida por la carga protónica (σ_H) que es la diferencia entre los moles de protones (q_H) y los moles de hidróxidos (q_{OH}), a complejados por superficies activas orgánicas, como el humus, e inorgánicas, como los óxidos hidratados y los aluminosilicatos de tipo caolinita y haloisita (Cruz y Geissert, 2000).

El alofano presenta propiedades particulares tales como la carga variable ya mencionada, alta capacidad de retención del ión fosfato y una alta afinidad por los cationes multivalentes en un rango de pH ácido. Las arcillas alofánicas tienen carga cero alrededor del $pH = 6.5$ y ellas apenas se dispersan sobre condiciones de pH muy ácido y muy alcalino. La cantidad de carga negativa aumenta con el incremento de la concentración de sales y con el aumento de pH y la cantidad de carga positiva aumenta con el decremento del pH. La dispersibilidad de las arcillas alofánicas es también afectada por grandes aplicaciones de fertilizante de P. Se sugiere que la carga positiva desarrollada es perturbada por el fertilizante debido a la adsorción del fosfato hacia el sitio con carga positiva. La dispersión sobre pH alcalino no es muy afectada por estos fertilizantes. La cantidad de P adsorbido por los Andosoles con alofano depende del contenido y

formas activas de Fe y Al así como del pH del sistema. La máxima adsorción de los fosfatos ocurre entre pH 3 y 4, y la cantidad de fosfatos adsorbido disminuye con el incremento de pH.

Los grupos funcionales que contribuyen a una variación de carga negativa son los carboxilos del complejo Al-humus y los silanoles del alofano y la imogolita que muestra una alta selectividad por cationes multivalentes tales como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} y cationes de metales pesados. Los cambios de carga variable positiva se deben a la protonación de grupos hidroxilo enlazados al Al del alofano o de la imogolita y a aquellos minerales enlazados a Fe. La capacidad de retención del P (en forma de ión H_2PO_4^-) depende del Al y/o Fe activo que contengan las neoformaciones minerales en suelos volcánicos. El ión ortofosfato no sólo reacciona con los sitios que tienen carga positiva sino también en los sitios neutros, sustituyendo a ligantes como OH^- y $\text{Si}(\text{OH})_3^-$ además de tener la propiedad de ser más reactivo que Cl^- , NO_3^- , ClO_4^- , SO_4^{2-} .

Un ejemplo de suelos que contienen neoformaciones minerales son los Andosoles con edades que van de 1,000 a los 5,000 años (Crews *et al.*, 1995). Estos suelos tienen una alta capacidad para adsorber P debido a su alto contenido de compuestos de Al y Fe activo, presentan una alta reactividad en sus fracciones coloidales con una superficie de área alta.

La cantidad de P extractable en medio ácido en suelos de origen volcánicos tiende a disminuir con el avance del intemperismo, lo cual es causado por la presencia de minerales secundarios de Al y Fe que reaccionan para formar complejos insolubles de fosfato de Al y Fe. Estas reacciones pueden ser más frecuentes en suelos más evolucionados como es el caso de los Cambisoles, Luvisoles y Acrisoles bajo condiciones de humedad alta (Figura 7). Esto da como resultado la deficiencia de P disponible para las plantas.

5. Objetivos

Con el presente trabajo se pretenden lograr los siguientes objetivos:

- Analizar la evolución de las diferentes fracciones de P (P no ocluido, P ocluido, P orgánico y P asociado a minerales primarios como fosfatos de calcio) en una cronosecuencia (de 0 a ~100,000 años) suelos volcánicos en la parte central de la Faja Volcánica Transmexicana (FVMTM) e identificar el P lábil o fácilmente disponible en tefras recientes y en suelos de distintas edades.
- Evaluar el efecto de la desecación de la muestra a temperatura ambiente en las fracciones de fósforo.
- Analizar el efecto de la exposición de las muestras a altas temperaturas, como las que prevalecen durante un incendio forestal, en el comportamiento del fraccionamiento de fósforo.
- Investigar la eficiencia y selectividad del método de fraccionamiento de P utilizado (método de Tiessen y Moir, 1993).

6. Hipótesis

Hipótesis 1:

Los resultados del fraccionamiento de P se ajustan al modelo planteado por Walker y Syres (1976):

- La cantidad de P total disminuye con la edad de desarrollo del suelo.
- El P asociado a fosfatos de calcio tipo apatita disminuye en los primeros 22,000 años.
- El P asociado a la materia orgánica aumenta en los primeros 10,000 años de evolución del suelo y se mantiene constante después.
- El P ocluido se incrementa continuamente con el tiempo.
- El P se encontrará disponible para las plantas en cantidades suficientes únicamente en las tefras frescas y en los suelos jóvenes (< 3000 años).

Hipótesis 2:

El secado al aire de las muestras aumenta el P extraíble en las fracciones no ocluidas, y disminuye la proporción de P ocluido, en comparación con las muestras que se analizaron manteniendo la humedad de campo.

Hipótesis 3:

La quema o tratamiento térmico a 300°C de las muestras, simulando un incendio forestal, aumenta el P extraíble, particularmente en las fracciones no ocluidas, y disminuye la proporción de P asociado a la materia orgánica, así como el P ocluido en minerales de bajo orden estructural.

Hipótesis 4:

El método de fraccionamiento de Tiessen y Moir es eficiente y selectivo:

- La suma de las fracciones de P obtenidas a través del método de fraccionamiento es equivalente al P total analizado por fluorescencia de rayos X en alícuotas separadas de las muestras.
- La fracción del P orgánico se correlaciona con los contenidos de materia orgánica de las muestras.
- La fracción del P orgánico se correlaciona con los contenidos de Al extractable con pirofosfato de las muestras.
- El P ocluido se correlaciona con los contenidos de Al, Fe y Si extractables con oxalato (asociados a minerales de bajo orden estructural).
- El P ocluido se correlaciona con los contenidos de Al y Fe extractables con ditionito (asociados con óxidos e hidróxidos de Al y Fe cristalinos).

7. Materiales y Métodos

7.1. Sitio de estudio

Se seleccionaron 13 muestras de tefras y suelos volcánicos del sector central de la FVTM con diferentes edades de desarrollo localizados en los siguientes sitios: Paricutín (Edad 0 años), Paricutín (Edad 60 años) (Siebe *et al.*, 2005), Popocatépetl (Edad 1000 años), de la Sierra del Chichinautzin: Guespalapa (Edad 2,185 años), Tláloc (Edad 6,500 años) y El Pelado (Edad 10,000 años) (Siebe *et al.*, 2004), así como de la Sierra Monte Alto/Monte Bajo (García, 1998): Las Trojes y Quinto Barrio (~100,000 años) (Figura 10). Las edades de los sitios corresponden a fechamientos de ^{14}C no calibrados, reportados por los autores citados. Sólo para los sitios Las Trojes y Quinto Barrio no se cuenta con un fechamiento; la edad se deduce a partir del grado de modelación de las geoformas y su correspondencia con formaciones geológicas de edades > 100,000 años en la zona.

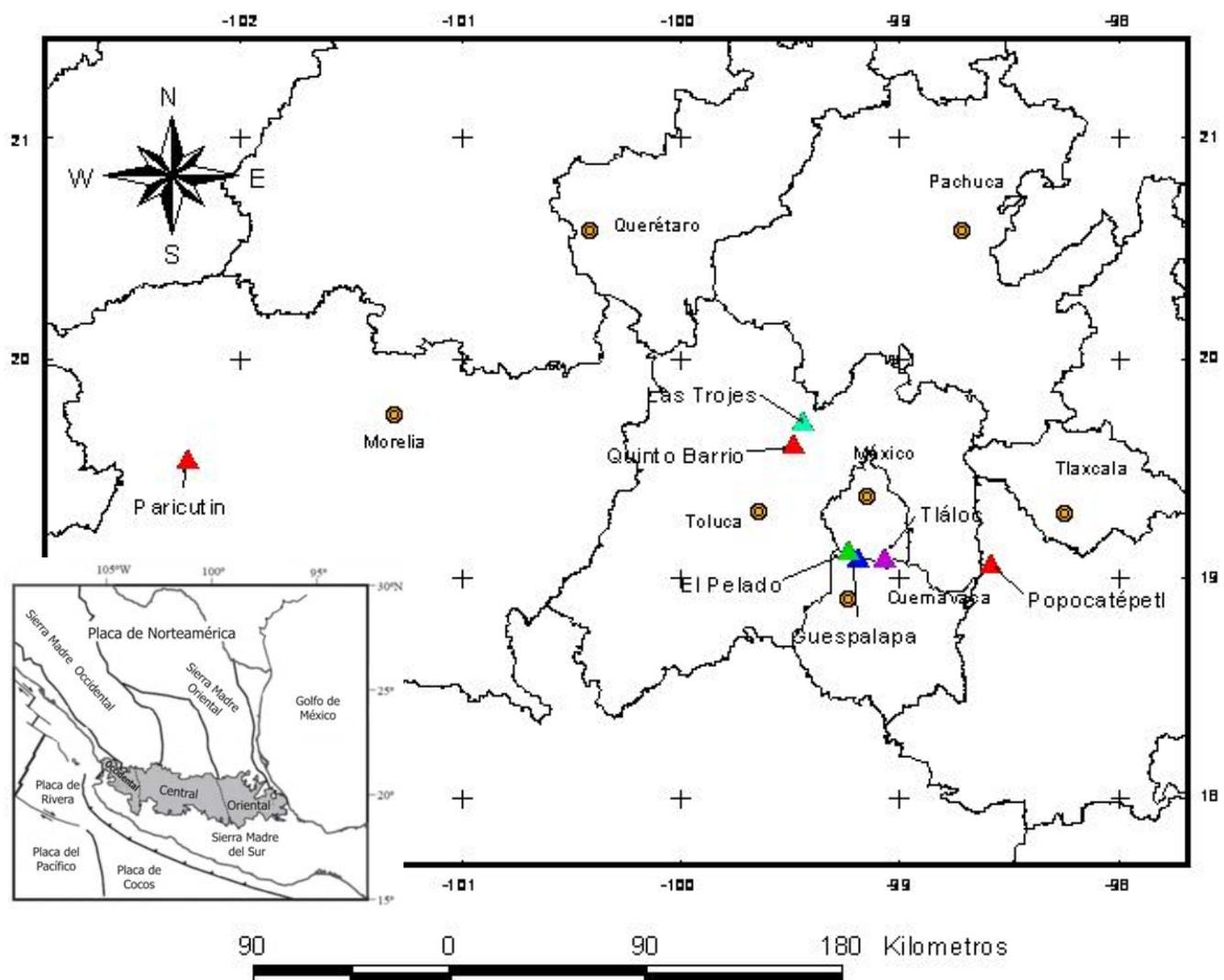


Figura 10. Ubicación de los sitios (▲) de colecta de las muestras utilizadas en este estudio.

7.2. Descripción de los suelos

Para este estudio se seleccionaron muestras de sitios que juntos conforman una cronosecuencia volcánica. Todos los sitios seleccionados tienen una cubierta vegetal de bosque de pino. La altitud fue de 2,350 m para la tefra y suelos del Parícutín, que representaron los primeros tiempos (0 y 60 años), 2,750 m para las muestras de los suelos más viejos en Las Trojes y Quinto Barrio (~100,000 años) y de 3,100 m para las muestras de los demás sitios que representaron los suelos con edades jóvenes e intermedias (1,000-10,000 años); estos últimos suelos tuvieron horizontes tipo A y tipo B. Los horizontes B se presentaron a partir de los 2,500 años en el sitio Guespalapa. Cada uno de los horizontes (Ah y Bw) fue colectado a todo lo ancho del perfil tratando de obtener una muestra representativa. Las muestras de los suelos con edades de 60 a ~100,000 años fueron colectadas entre los años 2004 y 2005, y se almacenaron en bolsas de plástico a temperaturas de 5°C para conservar la humedad de campo. La tefra fue proporcionada por el Instituto Smithsonian, donde se almacenan muestras tomadas durante la erupción del Parícutín en 1943 con clave PA 042-06, secas al aire.

En la Tabla 2 se presenta una descripción de los estudios previos que se efectuaron a los suelos con la finalidad de conocer sus propiedades físicas y químicas (Siebe *et al.*, 2005; Peña, en proceso). Las muestras analizadas pertenecen, a los horizontes Ah y Bw, y poseen pH de moderadamente ácido a neutro (5-7), alto porcentaje de P fijado (excepto en el Parícutín), media a alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) para los horizontes Ah en la mayoría de las muestras (entre 14 y 21 cmol/kg) en comparación con los horizontes Bw (entre 3 y 9 cmol/Kg), en los suelos de edades intermedias predominan los minerales de bajo orden estructural, según lo muestran los contenidos de Al, Si y Fe extractables con oxalato, mientras que las muestras de los suelos más evolucionados tienen altos contenidos de arcilla con baja capacidad de intercambio catiónico (probablemente caolinita o haliosita) y altos contenidos de Fe extractable con ditionito.

Tabla 2. Características de las muestras seleccionadas para realizar el fraccionamiento de P.

Localidad	Hzte ^z	Edad	Espesor	Densidad Aparente	Arcilla [€]	pH [†] agua	pH [†] KCl	P [‡] Bray	P fijado	C [§]	N [§]	CIC [¥]	Al ^d ^a	Si ^d ^a	Fe ^d ^a	Al ^o ^b	Si ^o ^b	Fe ^o ^b	Fe ^p ^c	Al ^p ^c
		Años	dm	kg/dm ³	%			mg/kg	%	%	%	cmol/kg	mg/g							
Paricutín ¹⁾	Cenizas	0																		
Paricutín ²⁾	AC	60	1.10	0.82	0.18	7.18	6.25	16.8	3.7	1.70	0.10	0.45	0.19	0.16	0.72	0.50	1.26	1.32	n. d.	n. d.
Popocatepet ³⁾	Ah1	1,000	0.90	0.85	4.20	5.48	4.78	119.8	37.5	6.35	0.47	7.20	1.91	0.73	2.82	2.57	0.19	2.30	0.94	4.24
Guespalapa ³⁾	Ah1	2,185	0.80	0.64	17.60	5.80	4.56	8.5	79.3	6.62	0.42	14.76	7.30	n. d.	15.08	15.96	5.19	13.00	1.58	3.79
Guespalapa ³⁾	Bw1	2,185	3.45	0.81	34.80	6.88	5.31	4.0	77.8	1.22	0.08	5.95	5.08	n. d.	15.98	17.53	7.59	16.05	0.49	1.22
Tlaloc ³⁾	Ah1	6,200	0.85	0.44	12.70	5.65	4.62	3.0	88.2	8.72	0.47	11.19	9.29	2.40	13.01	18.30	4.46	9.16	1.67	5.81
Tlaloc ³⁾	2Bw	6,200	1.95	0.47	9.10	6.52	5.41	n.d.	98.4	3.49	0.25	7.13	10.47	1.90	20.66	41.86	10.81	16.11	0.75	3.34
Pelado ³⁾	Ah1	10,000	1.05	0.45	10.30	5.67	4.62	5.1	90.6	14.52	0.80	21.75	8.73	1.78	12.28	17.60	2.74	10.05	2.48	6.84
Pelado ³⁾	Bw	10,000	5.10	0.73	8.30	6.66	5.47	0.3	92.8	1.81	0.15	6.49	6.53	2.04	20.18	38.51	12.36	14.90	0.30	1.43
Quinto Barrio ³⁾	Ah	100000	1.60	0.52	33.40	5.24	4.72	0.9	92.7	13.24	0.93	17.72	14.60	3.44	11.13	22.17	2.69	5.08	2.49	9.86
Quinto Barrio ³⁾	Bw1	100,000	0.90	0.78	32.90	5.71	5.54	1.2	78.7	1.41	0.12	3.35	6.99	1.29	27.93	10.51	1.46	4.91	0.64	2.04
Las Trojes ³⁾	Ah	>100000	0.60	n. d.	84.60	5.34	4.64	4.3	72.5	9.48	0.38	18.42	7.04	1.52	20.98	9.76	1.02	3.86	0.79	3.72
Las Trojes ³⁾	Bt(g)	>100000	2.00	1.07	82.20	5.79	4.66	0.2	42.9	1.03	0.08	8.37	4.29	1.05	32.00	2.61	0.49	1.50	0.09	0.31

Muestras proporcionadas por: 1) Instituto Smithsoniano; 2) Siebe *et al.* (2005); 3) Peña (tesis doctoral en proceso).

^z Horizonte

n. d. = no determinado, [†] pH medido potenciométricamente en una relación suelo-agua 1:2,5.

[‡] P disponible determinado mediante el método de Bray, (van Reeuwijk, 1995).

[€] Por determinación de texturas (Schlichting *et al.*, 1995)

[§] C y N total: medido en un determinador elemental de C N H S, Perkin Elmer 2400.

[¥] Capacidad de intercambio catiónico, calculado de la suma de cationes intercambiables con acetato de amonio a pH 7 más la acidez intercambiable (H⁺ + Al³⁺ extraídos con KCl 1M) (van Reeuwijk, 1995).

a: Al_d, Si_d y Fe_d : Al, Si y Fe extraídos con ditionito- citrato de sodio (Blume y Schwertmann , 1969).

b Al_o, Si_o y Fe_o : Al, Si y Fe extraídos con oxalato de amonio (Blume y Schwertmann , 1969).

c Al_p y Fe_p : Al y Fe extraídos con pirofosfato de sodio (van Reeuwijk, 1992).

7.3. Tratamiento previo de las muestras

Para determinar el comportamiento de las fracciones de P, aisladas por el fraccionamiento, en muestras sometidas a desecación o quema, se analizaron alícuotas de éstas tratadas previamente de las siguientes formas: conservadas a humedad de campo, secas al aire y sometidas a un tratamiento térmico a 300 °C en la mufla (quemadas). Esto se hizo tanto con las muestras de los horizontes A como de los horizontes B, así como con la muestra de tefra proporcionada por el Instituto Smithsonian. A continuación se detalla el manejo que se les dio a las muestras antes del fraccionamiento:

Muestras húmedas

En una alícuota de las muestras conservadas a 5°C a humedad de campo, se determinó gravimétricamente el contenido de humedad, a 105°C y 24 horas de exposición, con el siguiente cálculo:

$$\% \text{ de humedad} = [(\text{Peso fresco} - \text{Peso Seco}) / \text{Peso Fresco}] 100$$

Las muestras de tefra y del suelo de 60 años del Parícutín fueron proporcionadas secas al aire, por lo que no se pudieron analizar a humedad de campo.

Muestras secas

Otra parte de la muestra se dejó secar al aire y a la sombra y después se almacenó en bolsas de papel encerado.

Muestras quemadas

Una tercera fracción de cada muestra se colocó en una mufla a 300°C, temperatura característica que se alcanza durante los incendios forestales (Chistensen, 1985), durante 3 horas y se dejó enfriar durante un día. También estas muestras se colocaron en bolsas de papel encerado.

7.4. Fraccionamiento de P

Se siguió el procedimiento propuesto por Tiessen y Moir (1993) y Hedley *et al.* (1982). A continuación en la Tabla 3 se resumen las etapas de extracción y las fracciones de P que se consideran en el proceso. Los datos obtenidos de las fracciones P fueron agrupados con base en la propuesta de Crews *et al.* (1995) para desarrollar el modelo propuesto por Walker y Syers (1976). La metodología completa se describe en el Anexo I.

Tabla 3. Método de fraccionamiento de P

Procedimiento de extracción	Fracciones de P según Tiessen y Moir (1993) y Hedley <i>et al.</i> (1982)	Agrupación de las fracciones de P (Crews <i>et al.</i> , 1995) para desarrollar el modelo de Walker y Syers (1976)
0.5 g de muestra + RII [±] + 30 mL de H ₂ O ↓ Agitar 16 hrs. 20mL de HCl 0.5M ↓ Agitar 16 hrs. Determinar P (ICP-OES)	Pi lábil	
Centrifugar 10 min. 0°C 30mL de NaHCO ₃ 0.5M ↓ Agitar 16 hrs. ↓ Centrifugar 10 min. Separar Pi y Po Determinar P (ICP-OES)	Pi lábil Po lábil	P No Occ= Pi _{NaOH} + Pi _{NaHCO₃} + Pi _{RII} P Occ = Pi _{HCl conc.} + P _{H₂SO₄/H₂O₂}
30mL de NaOH 0.1M ↓ Agitar 16 hrs. ↓ Centrifugar 10 min. Separar Pi y Po Determinar P (ICP-OES)	Pi No Ocluido (P No Occ) Po lábil	PCa = P _{HCl 1M}
30mL de HCl 1M ↓ Agitar 16 hrs. ↓ Centrifugar 10 min. Determinar P (ICP-OES)	P Ca	Po = Po _{NaOH} + Po _{NaHCO₃} + Po _{HCl conc.}
15mL de HCl concentrado ↓ Calentar a 80 °C (Baño María) ↓ Centrifugar 10 min. Separar Pi y Po Determinar P (ICP-OES) 10mL de H ₂ O +5mL de H ₂ SO ₄ conc. ↓ Digestión a 360°C ↓ 0.5 mL H ₂ O ₂ ↓ Calentar hasta que clarifique Determinar P (ICP-OES)	Pi Ocluido (P Occ) Po Recalcitrante	

[±] Resina de intercambio iónico (IRA-410 Merck, descrita en el Apéndice) Pi= P inorgánico, Po = P orgánico,

P No Occ= P No Ocluido, P Occ= P ocluido, PCa= P de minerales primarios

A las extracciones con NaHCO_3 0.5 M, NaOH 0.1 M y HCl concentrado se les efectuó un procedimiento adicional para determinar por separado el P inorgánico (Pi) del P total del extracto (Pt -extracto) de $\text{Pi} + \text{Po}$. Como lo muestra el siguiente procedimiento.

Determinación de P t-extracto ($\text{Po} + \text{Pi}$) en NaHCO_3 0.5 M, NaOH 0.1 M y HCl concentrado

Se colocaron 10 mL de solución en un tubo de centrifuga de 50 mL. Se acidificaron los extractos de NaHCO_3 y NaOH a pH de 1.5 y se enfriaron a 5 °C por 30 min. Para acidificar el extracto de NaHCO_3 0.5M, se usaron 6 mL de H_2SO_4 0.9M y para acidificar el extracto NaOH 0.1, 1.6mL de H_2SO_4 0.9M. El extracto de HCl concentrado no se le agregó nada. Se centrifugó la suspensión para cada uno de los extractos (NaHCO_3 , NaOH y HCl) de suelo a 5000 rpm por 10 min. a -1 °C. Y se decantó el sobrenadante y se *determinó el P por* Espectrometría de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivo (*IPC-OES*) (Optima 4300DV, Perkin Elmer Instruments).

Determinación de P inorgánico en extractos de NaHCO_3 0.5M, NaOH 0.1M, y HCl concentrado

Se colocaron 5 mL de solución en un envase de 50 mL. Al extracto de NaHCO_3 0.5M: se le adicionó 0.5 g de persulfato de amonio + 10 mL de H_2SO_4 0.9M; al extracto de NaOH 0.1M: se le adicionaron aproximadamente 0.4 g de persulfato de amonio + 10 mL de H_2SO_4 0.9M; al extracto de HCl concentrado: se le adicionaron 0.4 g de persulfato de amonio + 10mL de agua desionizada. Se taparon los frascos sin apretar las tapas y se pusieron en baño María a 110°C: los extractos de NaHCO_3 y HCl por 60 min., el extracto de NaOH por 90min. Una vez que las muestras se aclararon se dejaron enfriar para después *determinar la concentración de P por ICP-OES*.

La diferencia de ambos extractos dio como resultado el P orgánico como lo muestra la siguiente ecuación:

$$\text{Pt-extracto} = \text{Po} + \text{Pi}$$

$$\text{Po} = \text{Pt-extracto} - \text{Pi}$$

donde Pi = P inorgánico y Po = P orgánico.

Determinación de P extractable

La determinación del P para cada uno de los extractos (702 muestras) fue analizada por ICP-OES mediante la técnica propuesta por Solomon *et al.* (2002) y Kuo,

(1996). Se hizo una curva de calibración con base en un estándar de 1,000 ppm ± 3 $\mu\text{g/mL}$ de P de en 0.05% de HNO_3 (High-Purity, cat. 100039-1) con concentraciones de 1 mg/L, 5 mg/L y 10 mg/L. El límite de detección (LD) fue de 0.04 mg/L, empleando agua desionizada como blanco.

Una vez que se tuvo la curva de calibración, las muestras fueron analizadas con tiempos de 1 min por muestra, revisando cada 100 muestras la calibración del equipo.

Cálculos utilizados

El fraccionamiento de P se realizó por duplicado en cada muestra para llevar un control de la reproducibilidad. Se calcularon los promedios, desviaciones estándar y el rango de las concentraciones obtenidas en cada fracción de los duplicados para cada muestra.

Para reportar el resultado en mg/Kg se realizó el siguiente cálculo:

$$\text{Concentración en mg/ Kg} = (\text{Muestra}) * (\text{V}_{\text{extractante}}) / \text{Peso inicial}$$

Para reportar la cantidad de P en g/m^2 se hicieron los siguientes cálculos:

$$P (\text{g/m}^2) = ((P (\text{mg/Kg})) (\text{d.a. (Kg/dm}^3)) (E (\text{dm})) (0.1)$$

Donde

d. a. = Densidad aparente (tomado de la Tabla 2)

E = espesor del horizonte

Considerando los primeros 10 cm de los horizontes A y B como el espesor (E).

Para obtener el porcentaje de cada una de las extracciones en función de la suma de todas las extracciones se realizó el siguiente cálculo:

$$P \text{ extracto (\%)} = (\text{cantidad de P extraído} * 100) / \Sigma \text{ de la concentración de P de los extractos}$$

Los datos obtenidos son mostrados los Anexos V y VI.

Las fracciones de P (P orgánico, P Ca, P Ocluido, P No Ocluido) se calcularon siguiendo las ecuaciones que se escriben a continuación y que se basan en el artículo de Crews *et al.* (1995) quienes aplicaron al modelo de Walker y Syers (1976):

$$P \text{ no ocluido} = P_i \text{ de la RII} + P_i \text{ del NaHCO}_3 + P_i \text{ del NaOH} = P \text{ No Occ}$$

$P_{\text{orgánico}} = P_o \text{ del NaHCO}_3 + P_o \text{ del NaOH} + P_o \text{ de HCl concentrado} = P_o$

$P_{\text{de Ca}} = P_{\text{del extracto de HCl 1M}} = P_{\text{Ca}}$

$P_{\text{ocluido}} = P_i \text{ de HCl concentrado} + \text{el extracto de la digestión} = P_{\text{Occ}}$

$\Sigma \text{ de Fracciones} = P_{\text{No Occ}} + P_o + P_{\text{Ca}} + P_{\text{Occ}}$

Los datos resultantes se reportan en los Anexos VII y VIII.

Disponibilidad de P

Como parte del fraccionamiento de P se obtiene el P disponible, en una extracción hecha con la resina de intercambio iónico (RII) y la parte inorgánica del NaHCO_3 0.5 M siguiendo el método descrito en la sección 7.4 y ampliado en el Anexo I, para los tres tratamientos previos (humedad de campo, desecado y quemado en la mufla a 300°C) tanto en el horizonte A como en el horizonte B.

donde

$P_{\text{disponible}} = P_i \text{ de la RII} + P_i \text{ del NaHCO}_3$

7.5. P total por FRX

Con la finalidad de conocer el P total y hacer una comparación de éste con el P obtenido de todos los extractos, las muestras de la tefra y los suelos fueron analizadas por Fluorescencia de Rayos-X (FRX) con un espectrómetro secuencial de Rayos-X (Siemens SRS 3000). La preparación consistió en tomar 1g de las muestras secas al aire (ver sección 7.3) y molidas, y mezclarlo con 9 g de mezcla fundente $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-LiBO}_2$ (50:50 % en peso). La mezcla fue vaciada en un crisol de Pt /5% Au y calentada a calcinación a $1,100^\circ \text{C}$ en un hornillo equipado con quemadores Fisher y moldes para la preparación simultánea de tres perlas (Fluxy Claisse) para tener las muestras fundidas (perlas). Después se consideró la pérdida por calcinación (PXC) determinada “base peso seco”, como la diferencia en porcentaje entre el peso seco y el peso calcinado de 1g de muestra calentada a 950°C por una hora con el programa CONTROLM.QAN (en el Anexo IX se muestran los datos obtenidos).

Cálculos utilizados.

El cálculo de la Pérdida por calcinación (PXC) es como sigue:

$$PXC (\%) = (\text{peso seco} - \text{peso calcinado}) \times 100$$

Como el P que se obtuvo de la FRX es dado en porcentaje de P_2O_5 se efectuaron los siguientes cálculos para obtener la cantidad de P en g/m^2 en los primeros 10 cm de profundidad de los horizontes A y B.

$$P (\%) = (\% \text{ de } P_2O_5) (0.436)$$

$$P (\text{mg/Kg}) = (\% \text{ de P}) 10000$$

$$P (g/m^2) = ((P (\text{mg/Kg})) (\text{d.a. (kg/dm}^3)) (E (\text{dm}))) (0.1)$$

Para conocer el porcentaje de P que se extrajo en relación al P total se efectuó el siguiente cálculo:

Para la suma de las fracciones

$$\% \text{ de } \Sigma \text{ de fracciones} = (\text{Cantidad de P} * 100) / P \text{ total}$$

Lo mismo se efectuó para cada uno de los porcentajes de las fracciones de P.

$$\text{Fracción de P (\%)} = (\text{Cantidad de P} * 100) / P \text{ total}$$

Los datos se presentan en los Anexos X y XI.

7.6. Análisis de regresión lineal para investigar el efecto de los tratamientos previos (secado al aire y tratamiento térmico a 300° C) de las muestras

El efecto de los tratamientos previos de las muestras (secado al aire y tratamiento térmico a 300°C en la mufla) sobre la concentración de P en los diferentes extractos, se analizó a través de un análisis de regresión lineal (Miller y Miller, 1993). En el análisis se utilizaron todas las fracciones de P, pero considerando por separado los horizontes Ah y los Bw. Para analizar el efecto del secado al aire de las muestras, se consideró como variable independiente el P extraído de las muestras a humedad de campo, y como variable dependiente al P extraído de las muestras secas, bajo el supuesto de que la desecación de las muestras desestabiliza a los minerales de bajo orden estructural y liberará el P asociado a éstos. Para analizar el efecto del tratamiento térmico sobre las fracciones de P se consideró al P extraído de las muestras secas al aire como variable independiente y al P extraído de las muestras quemadas a 300° C en la mufla como variable dependiente.

Para analizar el efecto de los tratamientos se comparó la pendiente y los coeficientes de regresión de las funciones ajustadas. Se calculó además el nivel de significancia (**p**), de R^2 y de la pendiente de la regresión, considerándolos estadísticamente significativos si su valor es menor a 0.05.

7.7. Análisis de correlación de las fracciones de P con las propiedades físicas y químicas de los suelos

Para este estudio se calcularon las correlaciones de Pearson (**r**) para medir la intensidad de la asociación lineal observada entre dos variables cuantificadas. Los valores de **r** varían entre +1 y -1. Los valores que mostraron una correlación cercana a +1 indican una asociación lineal directa estrecha y los valores que presentaron una correlación cercana a -1 una asociación lineal inversa entre las dos variables. Se consideró como variable Y a los datos obtenidos de las muestras para cada una de las fracciones de P y como variable X a las propiedades físicas y químicas de las tefras y los suelos que se presentan en la Tabla 2. Los coeficientes de correlación obtenidos se presentan en los Anexos XII-XV. Se calculó además el nivel de significancia de **r**, considerando que si su valor es mayor a 0.05 la correlación no era estadísticamente significativa y que con valores que se encontraban por debajo de 0.05 se consideró que **r** sí era estadísticamente significativa.

8. Resultados

8.1. Reproducibilidad de las determinaciones de P

En las Tablas 4 y 5 se muestran los promedios, desviaciones estándar y el rango de las diferencias que existen en las concentraciones encontradas en las dos réplicas de cada muestra analizadas en el laboratorio. Los promedios de las diferencias entre ambas réplicas varían entre 0.02 y 0.38 mg/L de P en horizontes Ah y entre 0.02 y 0.73 mg/L de P en horizontes Bw. La menor reproducibilidad se obtuvo en las extracciones con resinas de intercambio iónico (RII) de muestras quemadas de horizontes Ah (diferencias entre 0.67 y hasta 6.99 mg/L entre réplicas). La baja reproducibilidad en estos extractos puede deberse a que no se recupere toda la resina adicionada a la muestra (ruptura de las bolsas) o a que parte del suelo se quedó retenido en la bolsa. Relativamente baja reproducibilidad también se observó en las fracciones de P inorgánico (Pi) extraídas con NaOH, y HCl concentrado, así como en el P extraído con HCl 1M, en muestras de ambos horizontes. La mejor reproducibilidad se obtuvo en los extractos con NaHCO₃.

En el Anexo II se enlistan las concentraciones de P determinadas en todas las muestras. En ese mismo anexo se identificaron además a los extractos que presentaron coloraciones cafés a amarillentas, indicando la presencia ya sea de materia orgánica soluble o de formas solubles de hierro. Se observó que no todos los extractos obtenidos fueron incoloros (Anexo II). Los extractos con color corresponden mayoritariamente a los de NaHCO₃ y NaOH, de las muestras que en su pretratamiento conservaron su humedad de campo, así como aquellas que fueron secadas al aire. Debido a que la coloración que tuvieron estos extractos va de amarillo a café se puede predecir que existe la presencia de materia orgánica soluble que corresponde posiblemente a ácidos fúlvicos en solución que no fueron del todo eliminados, sobre todo en las fracciones donde se extrajo Pi. Es notorio el cambio que se tiene cuando las muestras son tratadas térmicamente a 300° C, ya que todos los extractos de éstas son de color transparente.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos de las diferencias en las determinaciones de P en los distintos extractos de las muestras de horizontes Ah.

	RII	NaHCO₃		NaOH		HCl 1M	HCl conc.		Digestión
		Ptotal	Pi	Ptotal	Pi		Ptotal	Pi	
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Horizontes Ah (todos los tratamientos)									
promedio	0.379	-0.029	-0.022	-0.089	-0.007	-0.190	0.085	0.186	-0.038
desvest	1.669	0.101	0.098	0.735	1.463	0.857	0.734	1.006	0.978
max	6.986	0.177	0.253	1.277	2.367	2.361	1.456	3.395	1.992
min	-0.862	-0.419	-0.321	-2.558	-5.326	-2.217	-1.971	-1.239	-2.483
Horizontes Ah (muestras secas)									
promedio	-0.054	-0.026	-0.045	-0.315	-0.680	-0.367	0.110	0.127	0.316
desvest	0.428	0.042	0.121	0.909	1.878	0.625	0.309	0.661	0.472
max	0.274	0.04	0.076	0.105	0.051	0.04	0.596	1.329	1.049
min	-0.862	-0.092	-0.321	-2.558	-5.326	-1.759	-0.23	-0.626	-0.216
Horizontes Ah (muestras quemadas)									
promedio	1.012	-0.011	-0.017	0.125	0.478	-0.229	-0.025	-0.092	-0.291
desvest	2.570	0.017	0.026	0.437	1.132	0.833	0.622	0.811	0.821
max	6.986	0.011	0.017	0.763	2.367	0.48	0.768	1.514	0.94
min	-0.665	-0.04	-0.055	-0.489	-0.922	-2.217	-0.819	-1.239	-1.48
Horizontes Ah (muestras húmedas)									
promedio	-0.032	-0.058	0.004	-0.069	0.242	0.099	0.199	0.634	-0.216
desvest	0.299	0.196	0.132	0.852	1.039	1.189	1.246	1.533	1.543
max	0.236	0.177	0.253	1.277	2.292	2.361	1.456	3.395	1.992
min	-0.465	-0.419	-0.141	-1.095	-0.649	-1.018	-1.971	-1.019	-2.483

desvest= desviación estándar, max = valor máximo, min= valor mínimo

Tabla 5. Estadísticos descriptivos de las diferencias en las determinaciones de P en los distintos extractos de las muestras de horizontes Bw.

	RII	NaHCO₃		NaOH		HCl 1M	HCl conc.		Digestión
		Ptotal	Pi	Ptotal	Pi		Ptotal	Pi	
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Horizontes Bw (todos los tratamientos)									
promedio	-0.102	-0.025	0.022	-0.043	-0.117	0.043	-0.039	0.734	0.269
desvest	0.325	0.048	0.030	0.360	0.724	0.713	0.704	1.621	0.545
max	0.323	0.018	0.097	0.619	0.922	1.325	1.239	5.192	1.187
min	-0.784	-0.077	-0.015	-0.939	-2.278	-1.529	-1.35	-1.372	-0.52
Horizontes Bw (muestras húmedas)									
promedio	-0.090		0.030	0.055	0.173	-0.186	0.507	1.070	0.175
desvest	0.164		0.042	0.412	0.437	0.285	0.434	2.463	0.457
max	0.052		0.097	0.619	0.922	0.111	1.239	5.192	0.933
min	-0.269		-0.015	-0.506	-0.179	-0.575	0.082	-1.372	-0.247
Horizontes Bw (muestras secas)									
promedio	0.166		0.010	-0.007	0.027	-0.464	-0.284	0.270	0.372
desvest	0.144		0.019	0.106	0.081	0.925	0.543	1.139	0.455
max	0.323		0.037	0.133	0.143	0.139	0.156	1.928	1.027
min	0.039		-0.008	-0.118	-0.031	-1.529	-0.891	-0.661	0.006
Horizontes Bw (muestras quemadas)									
promedio	-0.382	-0.025	0.023	-0.169	-0.624	0.530	-0.439	0.770	0.282
desvest	0.387	0.048	0.026	0.458	1.151	0.605	0.731	1.069	0.762
max	-0.012	0.018	0.052	0.249	0.394	1.325	0.547	2.224	1.187
min	-0.784	-0.077	-0.013	-0.939	-2.278	-0.112	-1.35	-0.161	-0.52

desvest= desviación estándar, max = valor máximo, min= valor mínimo

8.2 Efecto del secado y de la quema (tratamiento térmico a 300° C) de las muestras en la extracción de P de las diferentes fracciones

Las concentraciones de P determinadas en las muestras que conservaron su humedad de campo presentan una buena correlación con aquellas determinadas en muestras secadas al aire (Figura 11, los datos están en los Anexo III y IV), tanto en horizontes Ah como en horizontes Bw ($R^2= 0.91$ y 0.94). Así mismo las pendientes de los datos de los horizontes Ah y Bw son similares (0.91 y 0.99 respectivamente). En ambos casos las pendientes de las regresiones lineales son menores a 1, lo que indica que el secado disminuye ligeramente la concentración de P, independientemente del extracto. Este efecto es ligeramente mayor en los horizontes Ah que en los Bw.

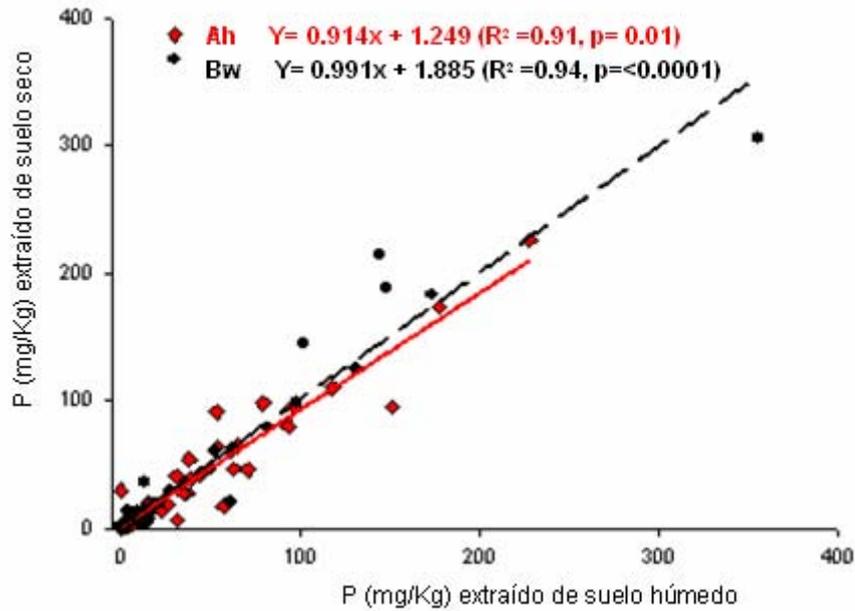


Figura 11. Comparación entre las regresiones lineales ajustadas a las concentraciones de P determinadas en las diferentes fracciones de P en muestras secas al aire y muestras que conservaron la humedad de campo. Cada punto representa el promedio de las dos réplicas analizadas de cada muestra (n=2).

Al graficar los datos por fracciones de P (Figura 12), se observa que en los horizontes Ah, los extractos de HCl 1 M presentan la mayor desviación del modelo lineal, correspondientes al P asociado a los minerales primarios tipo apatita.

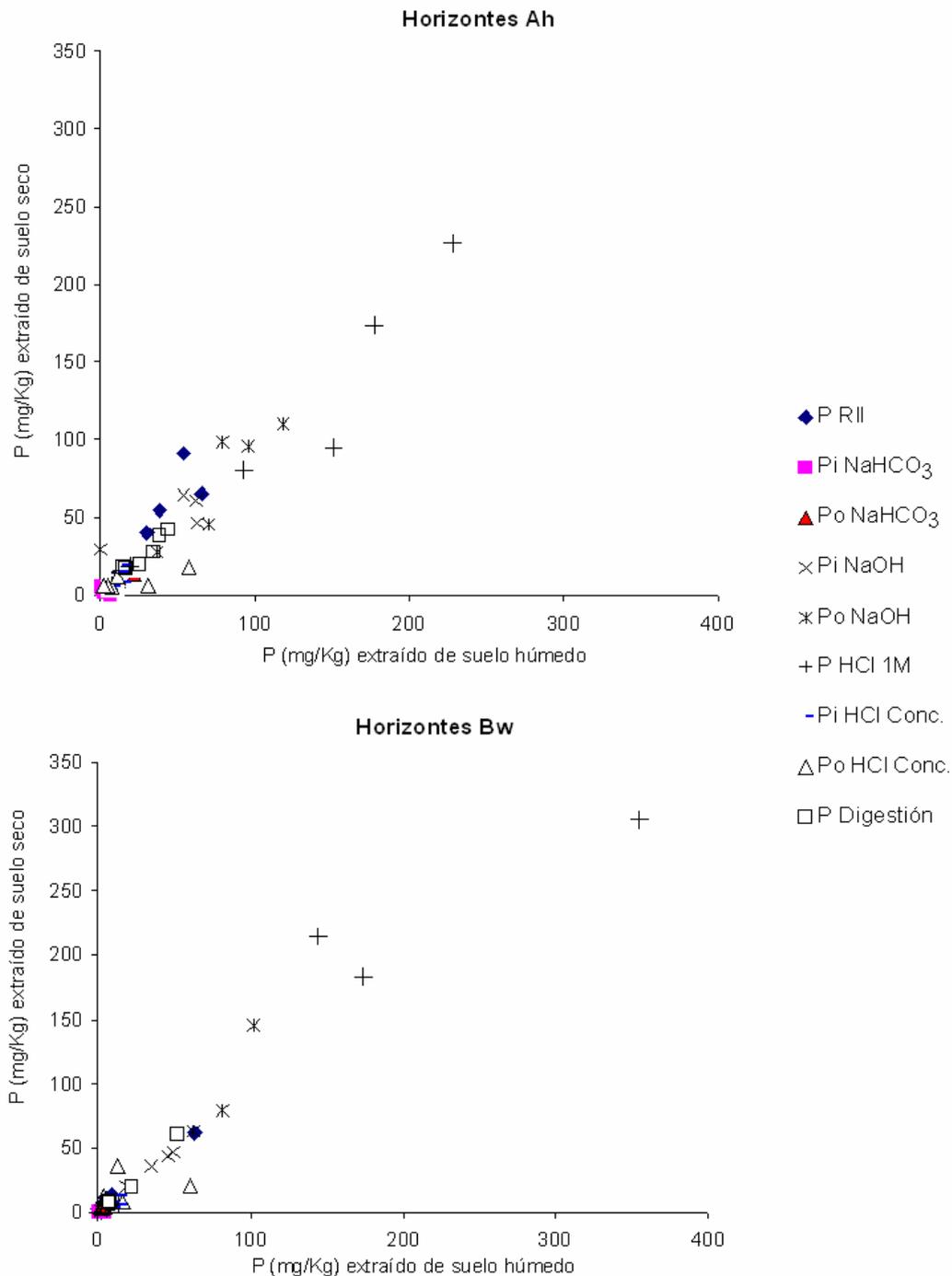


Figura 12. Comparación entre las concentraciones de P determinadas en los suelos secados al aire y los suelos que mantienen su humedad de campo en las diferentes fracciones de muestras provenientes de horizontes Ah y Bw.

Las regresiones lineales ajustadas a las concentraciones de P determinadas en los suelos secos y tratados térmicamente (quemadas a 300° C) (Figura 13, datos son presentados en los Anexos III y IV), presentaron una regresión lineal de $R^2=0.65$ y $R^2= 0.93$ para los

horizontes Ah y Bw, respectivamente. La pendiente de la regresión ajustada a los datos de los horizontes Ah ($m = 0.129$) es mucho menor que la ajustada a los datos de horizontes Bw ($m = 1.885$). Lo anterior indica que en los horizontes Ah el tratamiento térmico conlleva a una mayor extracción de P, que en los horizontes Bw. En estos últimos las diferencias entre el P extraído de muestras secas al aire o quemadas son bajas.

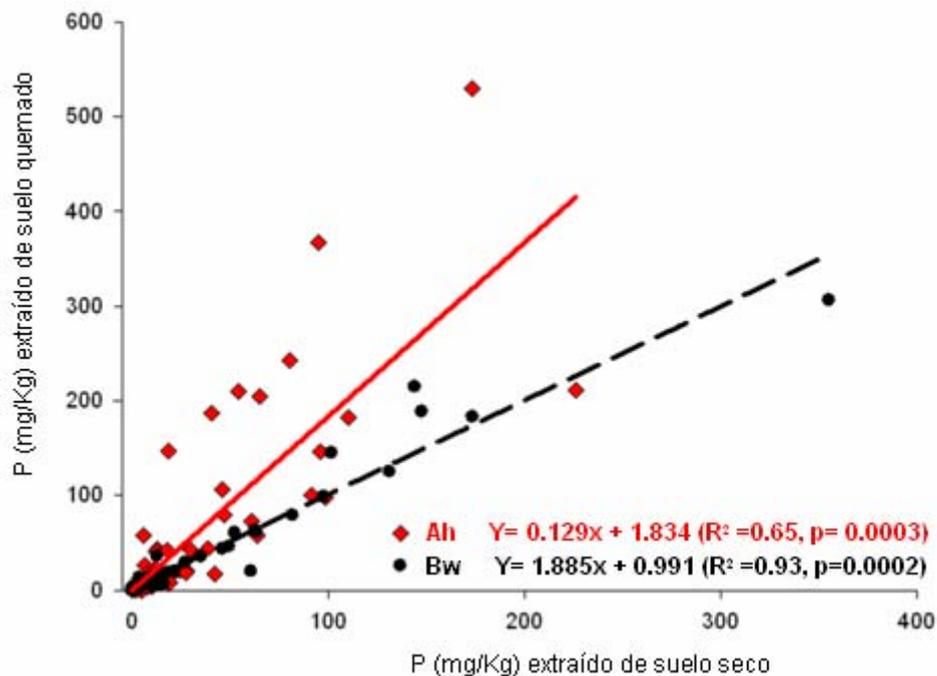


Figura 13. Comparación entre las regresiones lineales ajustadas a las concentraciones de P determinadas en las diferentes fracciones de P en muestras secas al aire y muestras sometidas a un tratamiento térmico (quemadas). Cada punto representa el promedio de las dos réplicas analizadas de cada muestra ($n=2$).

Nuevamente la fracción que se obtiene al extraer con HCl 1 M (fracción de P Ca) es la responsable de la dispersión de los datos en los horizontes Ah, y en menor proporción la fracción obtenida con la RII (Figura 14, Anexo III y IV). Este efecto es más claro en los horizontes Ah que en los Bw.

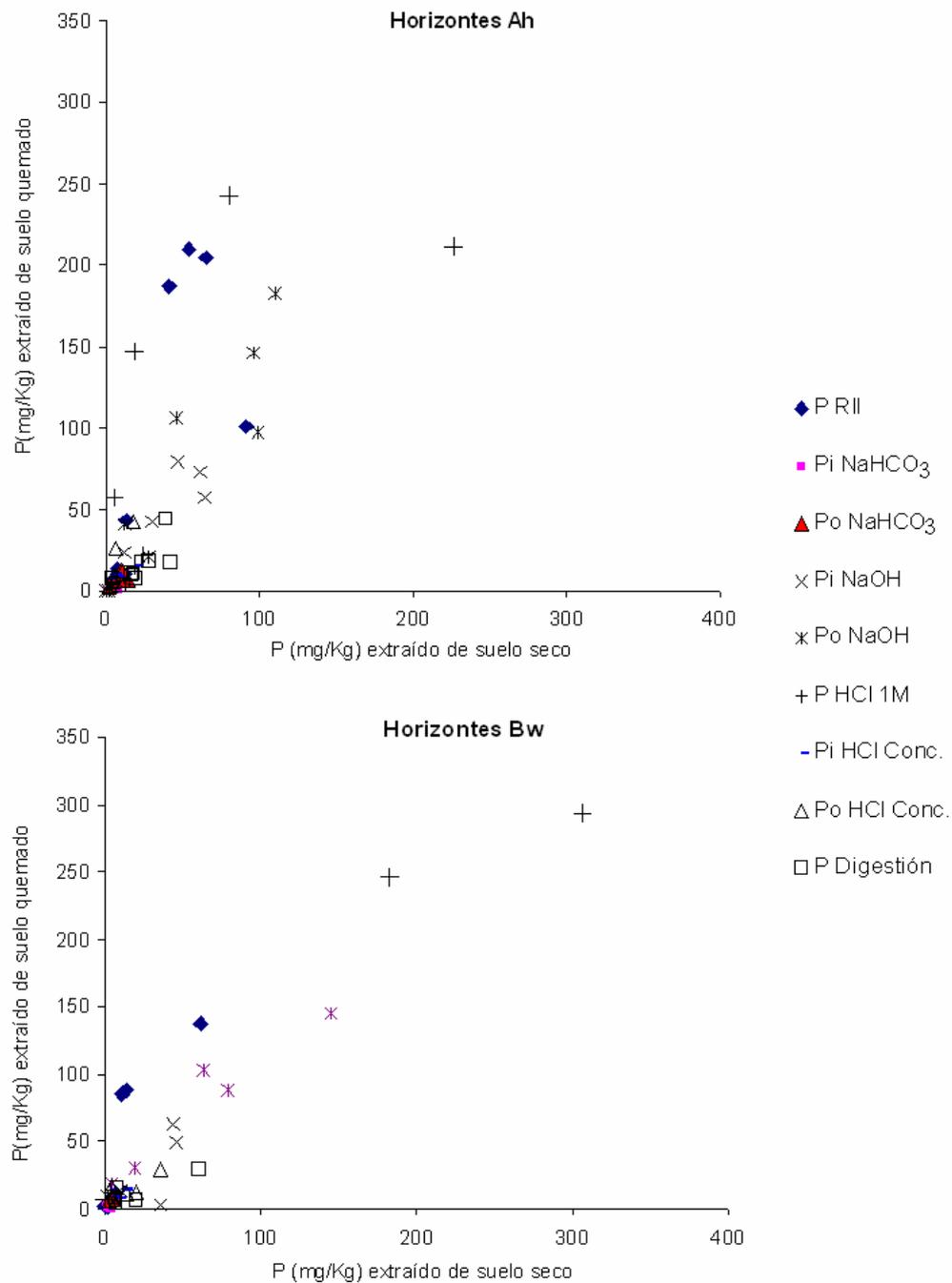


Figura 14. Comparación entre las concentraciones de P determinadas en los suelos secados al aire y los suelos sometidos a un tratamiento térmico (quema) en las diferentes fracciones de muestras provenientes de horizontes Ah y Bw.

8.3 Distribución relativa de las extracciones de P a lo largo de la cronosecuencia

En las Figuras 15 y 16 se muestra la distribución relativa de las extracciones que se obtuvieron en la etapa experimental con resinas de intercambio iónico (RII),

NaHCO₃, NaOH, HCl 1M, HCl concentrado y una digestión con H₂SO₄/H₂O₂ en función de la edad de la superficie de los horizontes Ah y Bw respectivamente (los datos obtenidos se reportan en los Anexos V y VI) para las muestras húmedas (Figuras 15A y 16A), las muestras secas al aire (Figuras 15B y 16B) y las muestras quemadas en la mufla (tratamiento térmico a 300°C) (Figuras 15C y 16C). Por lo propuesto por Crews *et al.* (1995), estas extracciones representan las fracciones de: 1) el Pi disponible de la extracción con la RII y de la fracción inorgánica de la extracción con NaHCO₃, 2) el P que está asociado con los óxidos e hidróxidos de Fe y Al en la fracción inorgánica de la extracción con NaOH, 3) el P relacionado con minerales primarios (P Ca) de la extracción con HCl 1M, 4) el P que se encuentra ocluido (P Occ) conforma la fracción inorgánica de la extracción con HCl concentrado junto con la extracción obtenida de la digestión con H₂SO₄/H₂O₂ y 5) el P orgánico (Po) que corresponde a la suma de las fracciones orgánicas de las extracciones con NaHCO₃, NaOH y HCl concentrado.

En las tres condiciones (húmedas, secas y quemadas) en las que se analizó al horizonte Ah (Figura 15), predomina la cantidad de P extraída con HCl 1M (30 a 60%) correspondiente al P que está asociado a los fosfatos de calcio, entre los cuales están minerales como la apatita (P Ca), con una máxima proporción de 60.4 % en la muestra quemada del Popocatepetl. En esta extracción la proporción del P va disminuyendo conforme aumenta la edad del material analizado, con mayor notoriedad en las muestras húmedas y secas. El P extraído con la RII, el cual corresponde al Pi disponible en el suelo (20-36%), tiende a disminuir a medida que se incrementa la edad de desarrollo, al igual que el P asociado a los fosfatos de calcio. Las muestras quemadas muestran en general las mayores proporciones de P extractable con RII. La fracción extraída con NaOH, que está asociada al Pi que no está ocluido y a parte del Po (30-45%), aumenta a lo largo de la cronosecuencia. Las extracciones de HCl concentrado y H₂SO₄/H₂O₂ (digestión), relacionadas con el Pi ocluido y con el Po recalcitrante, mostraron altos porcentajes en la tefra y en los suelos de 60 años así como en los suelos de >100,000 años de edad (muestra húmeda de Quinto Barrio con 31.3%). Las muestras de edades intermedias (1,000-10,000 años) tienen proporciones bajas de Pi ocluido y de Po recalcitrante; este es el caso especialmente de la muestra quemada de Guespalapa (2,185 años) con 2.1 %. La fracción de P lábil que fue extraída con NaHCO₃ se mantuvo entre 2 y 7% en todas las muestras y sólo alcanzó 10.6% en la muestra analizada a humedad de campo del Popocatepetl.

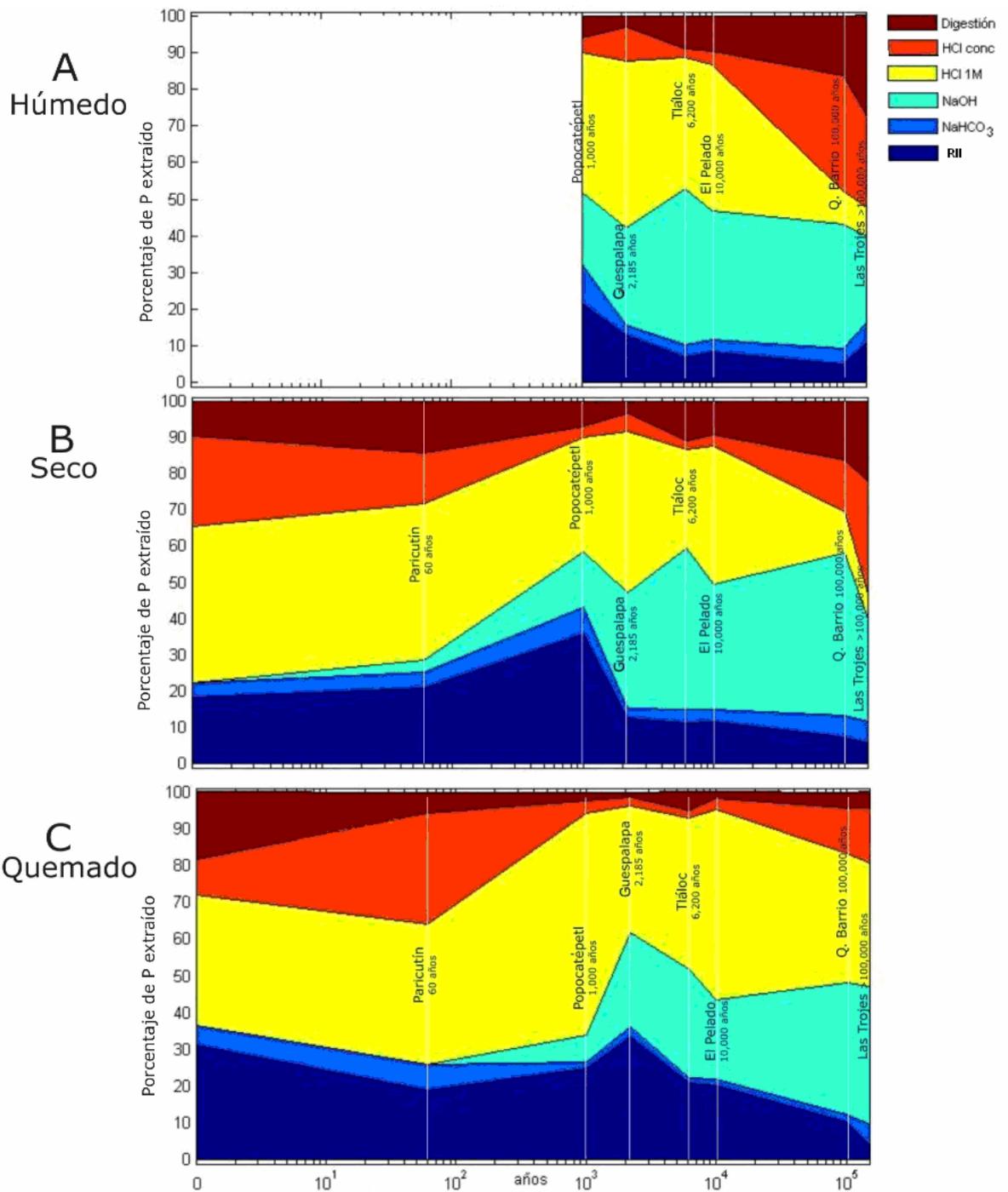


Figura 15. Distribución relativa de las fracciones de P en muestras de horizontes Ah a lo largo de la cronosecuencia analizadas a humedad de campo (A), después de ser secadas al aire (B), y después de haber sido quemadas a 300 °C en una mufla (C).

En los horizontes Bw (Figura 16) la fracción extraída con HCl 1M (P Ca) es proporcionalmente mayor que en los horizontes Ah. Por ejemplo, en la muestra del sitio Guespalapa (2,185 años), esta fracción fue 60.9 % de la suma de las fracciones en la muestra húmeda, 58.4 % en la muestra seca y 47.2 % en el suelo quemado a 300°C. Esta fracción disminuye a medida que se incrementa su edad de desarrollo. La

proporción extraíble con NaOH fue relativamente elevada en todas las muestras. La extracción con HCl concentrado (P Occ) aumentó al incrementar la edad de los suelos, y alcanzó 63.9 % de la suma de las fracciones (Figura 16A) y 52.8 % (Figura 16B) en las muestras húmedas y secas de los suelos de Las Trojes. La fracción extraída con la digestión de H₂SO₄/H₂O₂ fue similar a la obtenida de los horizontes Ah, con la peculiaridad de que en la muestra de volcán Tláloc (6,200 años) disminuyó de 14% en la muestra con humedad de campo a 4% al ser quemada en la mufla a 300°C. En la extracción con la RII (Pi disponible) la proporción de P fue baja (hasta 12%, Figuras 16A y 16B) y aumentó al quemar las muestras (Figura 16C), particularmente en la muestra del sitio Guespalapa donde alcanzó 22.2 % de la suma de las fracciones. Nuevamente la fracción de P extraída con NaHCO₃ fue muy baja (1-9%) en todas las muestras de la cronosecuencia.

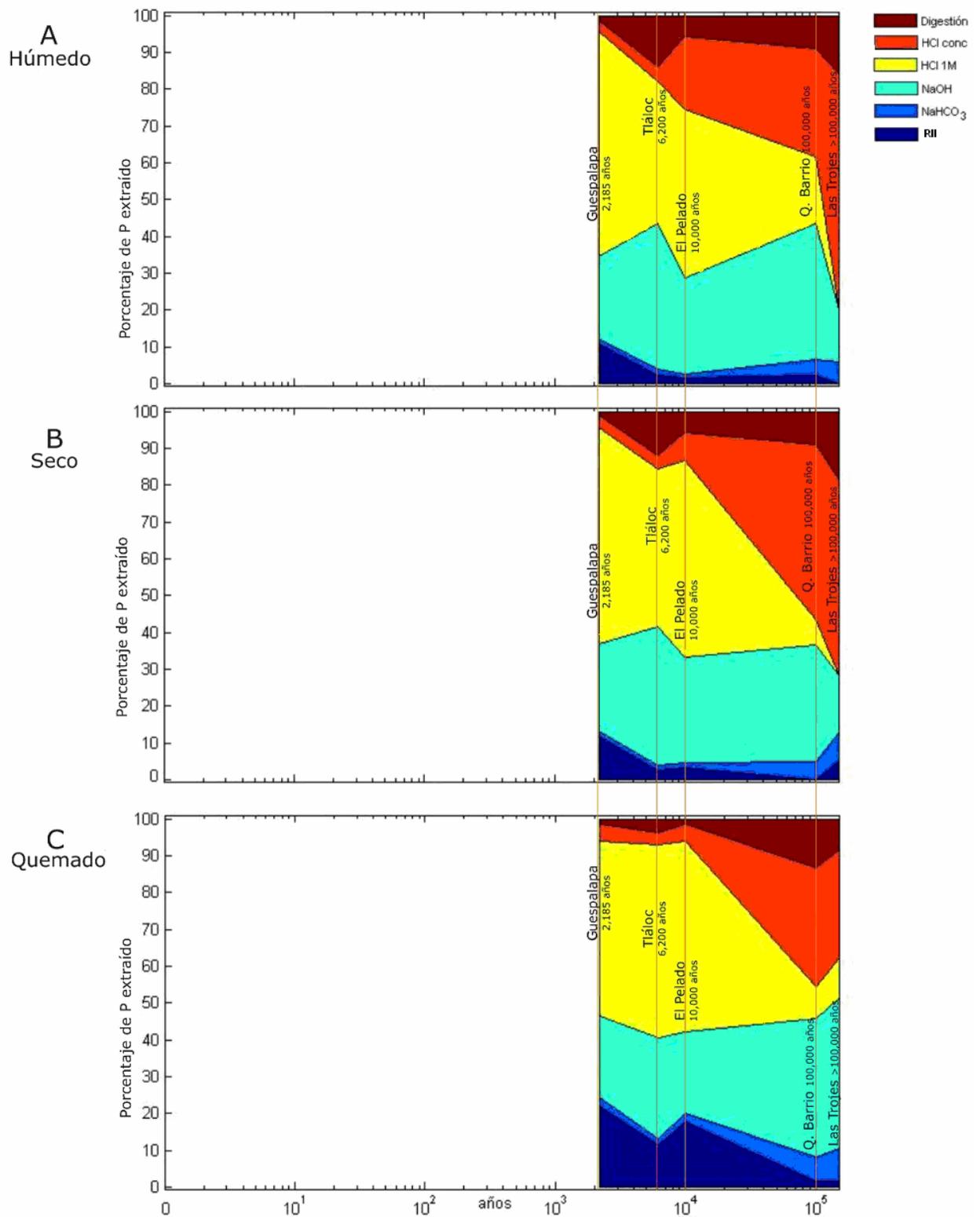


Figura 16. Distribución relativa de las fracciones de P en muestras de horizontes Bw a lo largo de la cronosecuencia analizadas a humedad de campo (A), después de ser secadas al aire (B), y después de haber sido quemadas a 300 °C en una mufla (C).

8.4. Fraccionamiento de P (Modelo de Walker y Syers)

Las fracciones P orgánico (Po), P ocluido (P Occ), P no ocluido (P No Occ) y P mineral (P Ca) que propone el modelo de Walker y Syers (1976) y que fueron

retomadas por Crews *et al.* (1995) (ver Tabla 2) se muestran en las Figuras 17 y 18 (los datos se reportan en los Anexos VII y VIII). En el horizonte Ah, para los tres pretratamientos de las muestras (Figura 17A, Figura 17B y Figura 17C), el modelo presenta un aumento de la cantidad de P asociada a cada fracción (Po, P Occ, P No Occ, P Ca) hasta llegar a edades intermedias de 10,000 años y después disminuye nuevamente en los suelos muy desarrollados (Quinto Barrio y Las Trojes). Existe un predominio del P que está asociado a los minerales primarios (P Ca) en relación a las otras fracciones. En esta última fracción la muestra de Guespalapa con 2,185 años de edad presenta la máxima cantidad de P en las muestras analizadas a humedad de campo y secadas al aire con 14.6 g/m^2 y 14.5 g/m^2 respectivamente, con una notoria disminución de 6.6 y 4.2 g/m^2 en la muestra del Tláloc con 6,200 años de edad. En las muestras que fueron quemadas, la máxima cantidad de P extractable con el fraccionamiento se obtuvo en la muestra de El Pelado (23.7 g/m^2) con 10,000 años de edad y seguida de la muestra con 1,000 años del Popocatepetl que tiene una cantidad de 20.7 g/m^2 . Después del P Ca las fracciones relacionadas con el fósforo orgánico (Po) y el fósforo no ocluido (P No Occ), que incluye al P disponible y al P asociado a los óxidos de Al y Fe (Crews *et al.*, 1995), son las que ocupan mayores proporciones a partir de los 2,185 años de edad. Las cantidades varían entre de 7.8 g/m^2 en Po y 7.9 g/m^2 en P No Occ para las muestras húmedas, 7.5 g/m^2 y 8.5 g/m^2 respectivamente para las muestras secas y 6.9 g/m^2 de Po y 17.1 g/m^2 de P No Occ para las muestras calcinadas. En estas dos fracciones las muestras del volcán Tláloc quemadas en la mufla (6,200 años de edad) tienen mayores cantidades (8.9 g/m^2 y 11.9 g/m^2 , respectivamente) que las muestras húmedas y secas de este mismo sitio (4 g/m^2 a 6 g/m^2). La fracción P ocluido (P Occ) mostró cantidades muy bajas de 1 g/m^2 a 3 g/m^2 en todas las muestras.

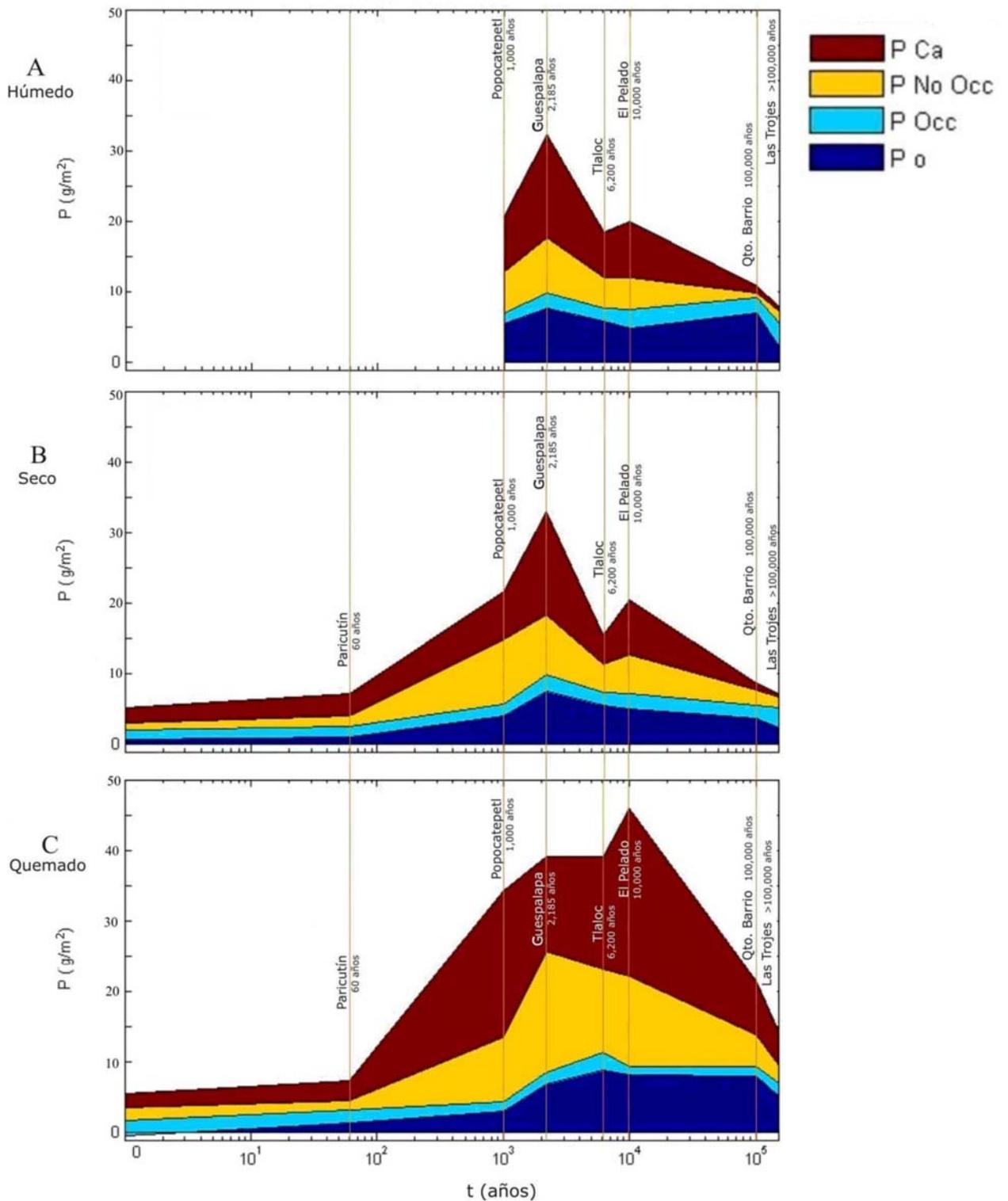


Figura 17. Comportamiento de las fracciones de P en muestras de horizontes Ah a lo largo de la cronosecuencia analizadas a humedad de campo (A), después de ser secadas al aire (B), y después de haber sido quemadas a 300°C en una mufla (C).

Las muestras de los horizontes Bw Figuras 18A, 18B y 18C) presentan un comportamiento similar a las de los horizontes Ah, puesto que conforme aumenta la edad del suelo disminuye la cantidad de P extraído con el fraccionamiento para los tres pretratamientos. Sin embargo, las cantidades mayores se extrajeron de la fracción de P Ca del suelo del volcán Guespalapa (2,185 años) con 28.6 g/m^2 en las muestras conservadas a humedad de campo, 24.7 g/m^2 en las que fueron secadas al aire y 23.6 g/m^2 en las que tuvieron un tratamiento térmico a 300°C . Los suelos del volcán Tláloc (6,200 años) son los que presentan cambios más notorios después de ser quemados; al aumentar principalmente en las fracciones P Ca y el Po. La fracción de P orgánico (Po) es la segunda más dominante después de P Ca en la mayoría de las muestras, aunque también la fracción P No Occ es importante, sobre todo en algunas muestras que fueron quemadas y secas al aire. Nuevamente la fracción ocluida (P Occ) permite observar cantidades de P bajas que van de 1.2 g/m^2 a 3 g/m^2 en toda la cronosecuencia para los tres tratamientos.

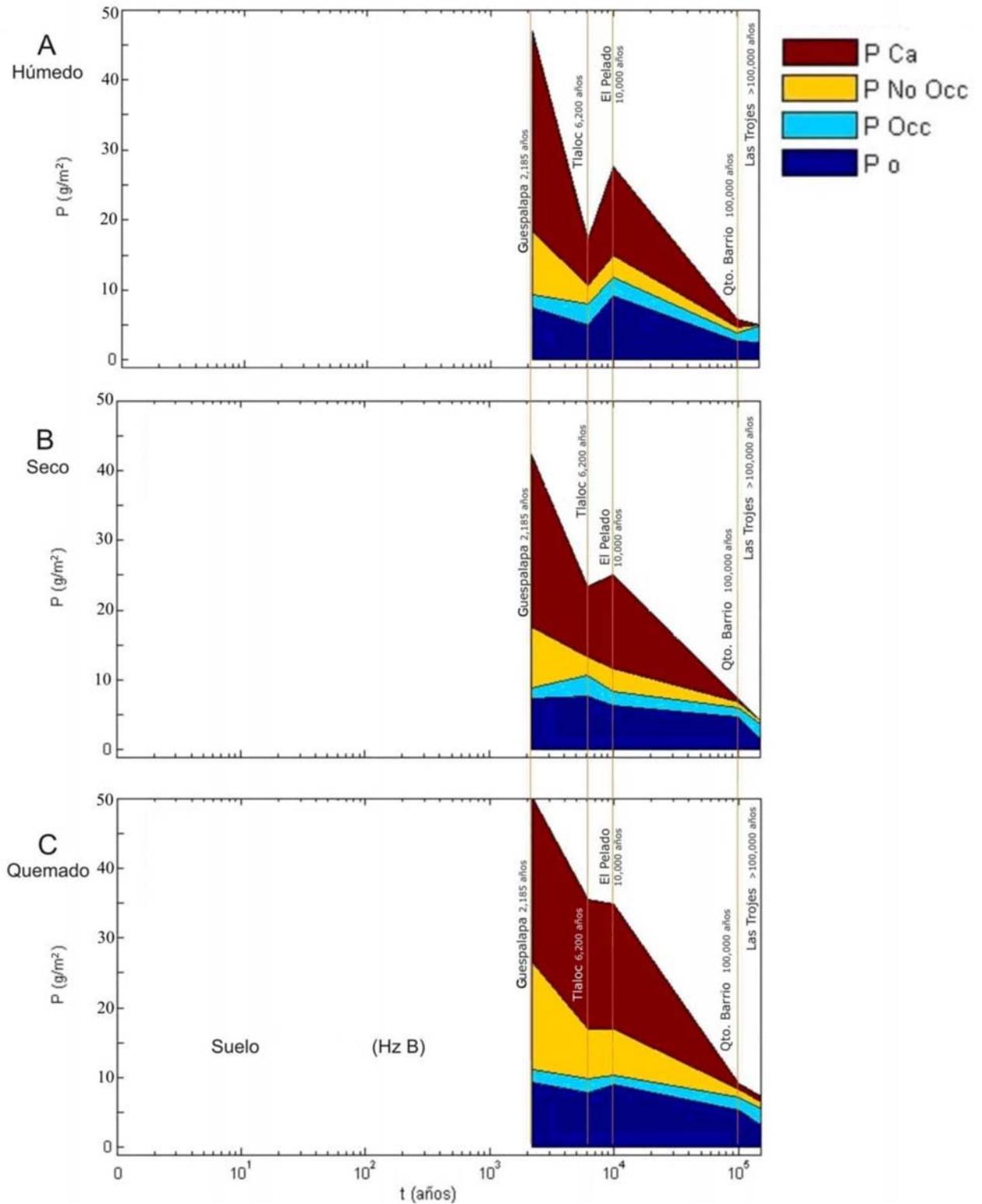


Figura 18. Comportamiento de las fracciones de P en muestras de horizontes Bw a lo largo de la cronosecuencia analizadas a humedad de campo (A), después de ser secadas al aire (B), y después de haber sido quemadas a 300 °C en una mufla (C).

8.3. P total

El P total en la tefra y en los suelos analizado por FRX se muestra en la Figura 19. El P total se expresa en g/m^2 en función de la edad de los suelos y separando los

horizonte Ah de los Bw. En los horizontes Ah la cantidad de P total presenta un intervalo de 87 y 172 g/m² en la tefra y en los suelos jóvenes (< 2,185 años) y disminuye a aproximadamente 109 g/m² en la muestra del volcán Tláloc (de 6,200 años de edad) de la Sierra del Chichinautzin y entre 68-57 g/m² en los horizontes Ah de las muestras con más de 100,000 años de edad (Quinto Barrio y Las Trojes) de la Sierra Monte Alto/Monte Bajo. En los horizontes Bw la cantidad de P total también disminuye de 195 g/ m² (Guespalapa) a 40 g/m² (Quinto Barrio) en las muestras con 100,000 años (ver datos en el Anexo IX).

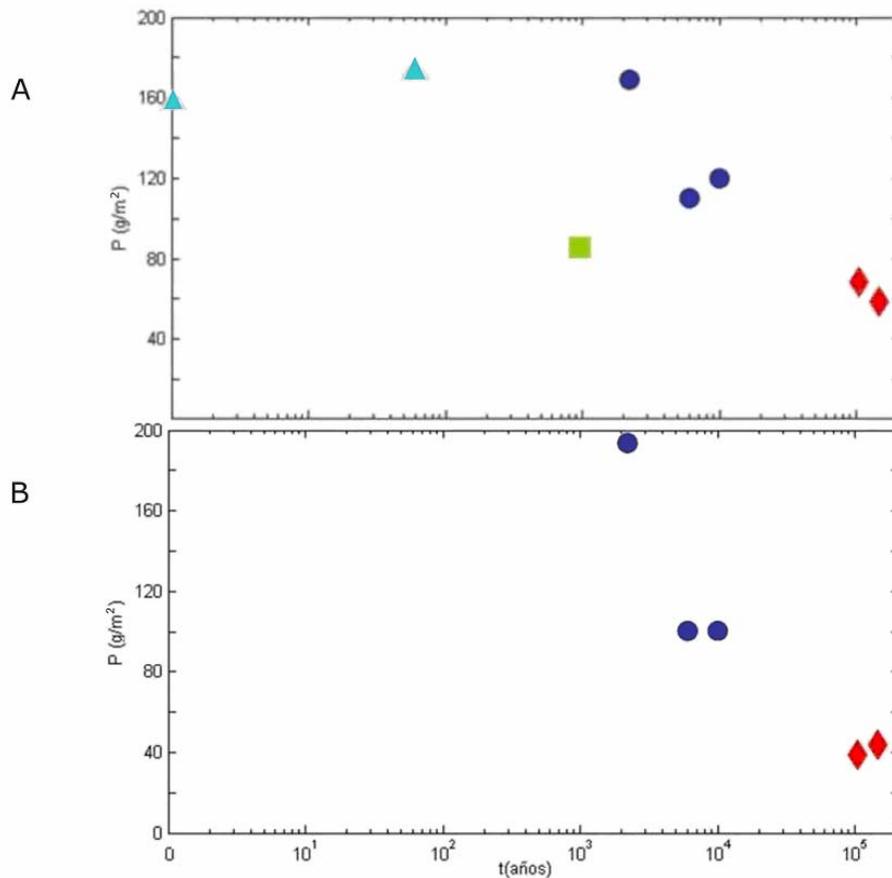


Figura 19. Contenido de P total de las muestras de tefra y suelos volcánicos de las regiones de el Parícutín (▲), el Popocatepetl (■), La Sierra del Chichinautzin (●) y la Sierra Monte Alto/Monte Bajo (◆) en: (A) el horizonte Ah y (B) en el horizonte Bw.

8.4. P total y su relación con la suma de las fracciones

La suma de la cantidad de P determinada en las fracciones (P_o, P No Occ, P Occ, P Ca) de las muestras sometidas a los diferentes tratamientos previos al análisis

(humedad de campo, seca al aire y quemada a 300°C) se comparó con los resultados del análisis de P total realizado con la FRX (Figura 20 y Tablas 6 y 7).

La suma de las fracciones de P en las muestras del horizonte Ah, sometidas a todos los tratamientos, resultó mucho menor que el P total de esas mismas muestras (Figura 20, los datos son presentados en los Anexo VII y VIII). En muestras analizadas a humedad de campo, el método de extracción por fracciones extrajo sólo entre 13.9 y 23.8% del P total (Tabla 6). Los porcentajes de P extraídos con el fraccionamiento aumentaron considerablemente (hasta 39.5%), cuando las muestras se sometieron al tratamiento térmico (Quemada), mientras que el secado de al aire (3.4-24.9%) no influyó sobre la proporción de P total extraída. Es notable que el fraccionamiento sólo lograrse extraer entre 3 y 4% del P contenido en las cenizas del Paricutín. Las mayores proporciones de P total se extrajeron de la muestra de suelo del Popocatépetl con 1,000 años de edad (23.8% con húmeda de campo, 24.9% secadas al aire y 39.2% en las que fueron tratadas térmicamente). Se observa una tendencia clara de disminución en la proporción de P extraída conforme aumenta la edad de los suelos analizados.

Las muestras que fueron sometidas a 300° C en la mufla fueron de las que se extrajo mayor cantidad de P, a diferencia de las que conservaron su humedad de campo y las que fueron secadas a temperatura ambiente en toda la cronosecuencia.

Tabla 6. Proporciones (%) que se obtuvieron de la suma de las fracciones de P que se obtuvieron de las muestras húmedas, secas y quemadas en relación al P total de los horizontes Ah.

Sitio	Edad años	P total g/m ²	Σ fracciones Húmeda ^a		Σ fracciones Seca ^b		Σ fracciones Quemada ^c	
			g/m ²	%	g/m ²	%	g/m ²	%
Paricutín	0	158.0	-	-	5.3	3.4	5.5	3.5
Paricutín	60	172.3	-	-	7.3	4.3	7.3	4.2
Popocatépetl	1,000	87.4	20.8	23.8	21.8	24.9	34.3	39.2
Guespalapa	2,185	169.7	32.3	19.0	32.9	19.4	39.2	23.1
Tlálloc	6,200	109.6	18.7	17.0	15.6	14.2	39.3	35.8
El Pelado	10,000	121.6	20.0	16.5	20.4	16.8	45.9	37.8
Quinto Barrio	100,000	68.4	10.8	15.8	8.8	12.8	21.5	31.5
Las Trojes	>100,000	57.3	7.9	13.9	7.2	12.6	14.4	25.1

^a Muestras que conservaron su humedad de campo, ^b Muestras que se secaron al aire, ^c Muestras con tratamiento térmico a 300° C.

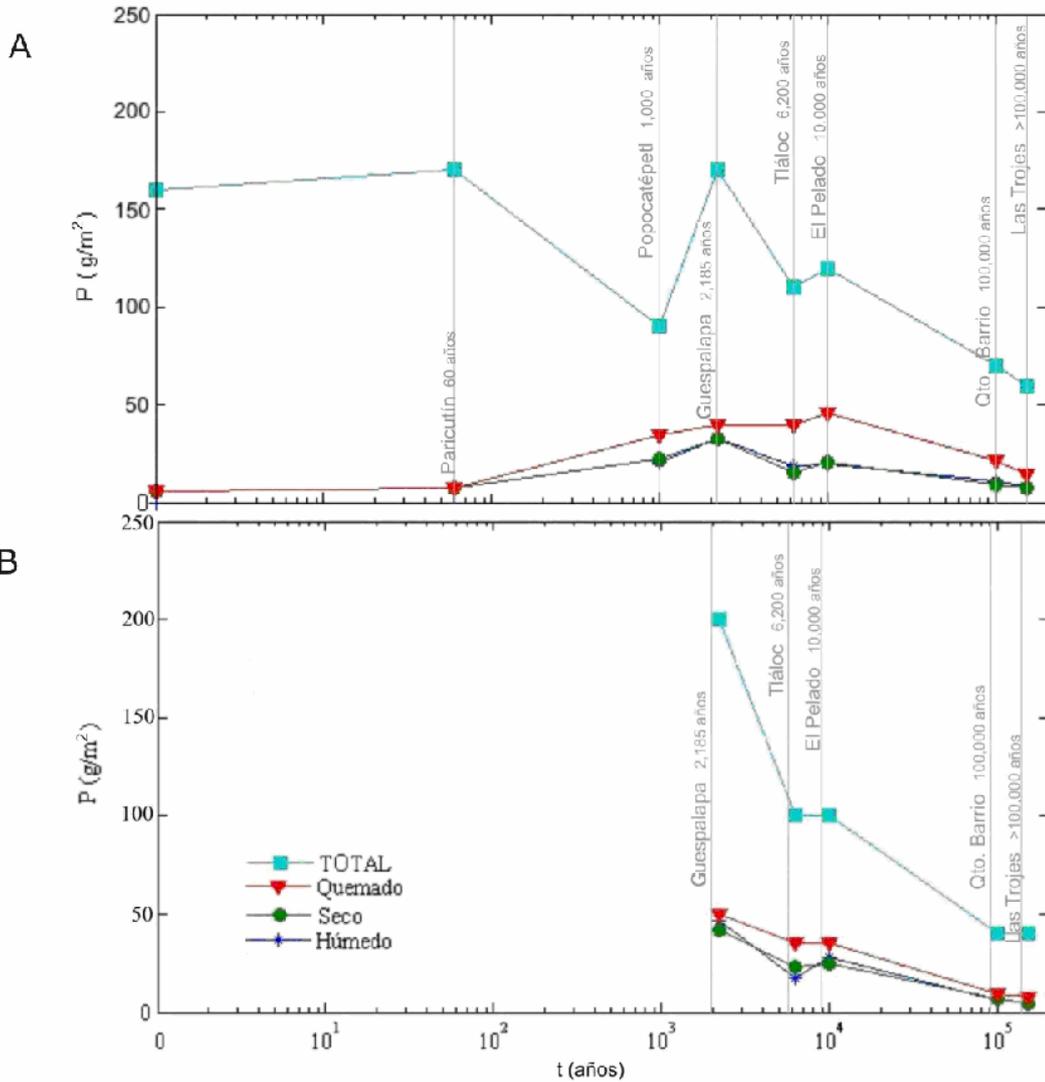


Figura 20. Comparación del P total (■) con las sumas de las fracciones de P a lo largo de la cronosecuencia analizadas a humedad de campo (*), después de ser secadas al aire (●), y después de haber sido quemadas a 300° C en una mufla (▼) en: (A) los horizontes Ah y (B) los horizontes Bw.

La proporción de P total que se extrajo en los horizontes Bw, cuando se sumó el P extraído en cada una de las fracciones, varió entre 35.8 % y 9.2 % del total (Tabla 7), resultado similar al obtenido para los horizontes Ah. Las mayores proporciones extraídas se encontraron en el suelo de 10,000 años de edad (volcán El Pelado) y en las muestras húmedas y secas, con 28.0 % y 25.4% respectivamente, así como en la muestra quemada del suelo del volcán Tlaloc con 35.7%, como lo muestra la Tabla 7. Los valores más bajos se encontraron en los suelos de Las Trojes con 11.3 %, 9.2 % y 16.6 % respectivamente, sitio donde están los suelos más antiguos de la cronosecuencia.

Tabla 7. Proporciones (%) que se obtuvieron de la de suma de las fracciones de P que se obtuvieron de las muestras húmedas, secas y quemadas en relación al P total de los horizontes Bw.

Sitio	Edad años	P TOTAL g/m ²	Σ fracciones Húmeda ^a		Σ fracciones Seca ^b		Σ fracciones Quemada ^c	
			g/m ²	%	g/m ²	%	g/m ²	%
Guespalapa	2,185	195.3	47.0	24.1	42.2	21.6	50.1	25.6
Tláloc	6,200	99.2	17.4	17.5	23.4	23.5	35.5	35.8
El Pelado	10,000	98.9	27.7	28.0	25.1	25.4	34.9	35.3
Quinto Barrio	100,000	38.5	5.8	15.1	7.3	18.9	9.2	24.0
Las Trojes	>100,000	44.4	5.0	11.3	4.1	9.2	7.4	16.6

^a Muestras que conservaron su humedad de campo, ^b Muestras que se secaron al aire, ^c Muestras con tratamiento térmico a 300° C.

8.5. Porcentajes de las fracciones respecto a la cantidad de P total

En las Figuras 21 y 22 se muestran los porcentajes de cada una de las fracciones de P (Po, P Occ, P No Occ y P Ca) en relación al P total para los horizontes Ah y Bw, respectivamente, con el objetivo de conocer cómo se distribuyen las fracciones en comparación con el P total (ver anexos X-XI).

En ambos horizontes, las muestras que fueron quemadas en la mufla a 300 °C presentan un aumento notorio de la fracción P Ca con porcentajes máximos de 23.6 % en el horizonte Ah de la muestra del volcán Popocatepetl (1,000 años). La fracción de P No-Occ también tuvo un comportamiento similar a la fracción P Ca, pero con porcentajes cercanos a 10% en el horizonte Ah y a 7% en el horizonte Bw entre los 1,000 y 10,000 años. En la mayoría de las muestras quemadas (tratadas térmicamente a 300°C) el porcentaje de la fracción de P orgánico (Po) fue menor al de las fracciones P Ca y P No Occ entre los 1,000 y 10,000 años. La fracción de P Occ tuvo porcentajes bajos que llegan a un máximo alrededor de 5% en las muestras del volcán Las Trojes con > 100,000 años.

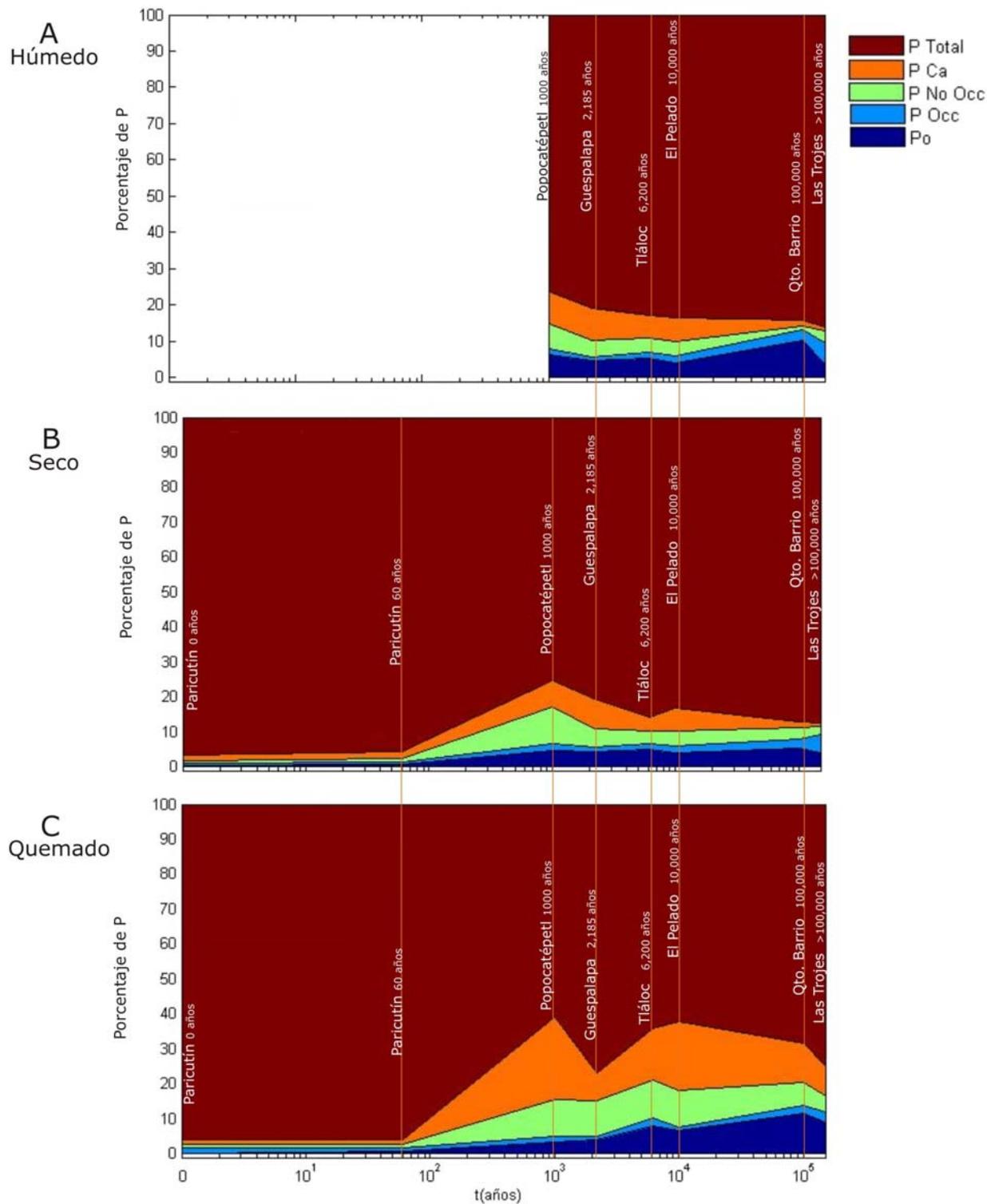


Figura 21. Porcentaje de las fracciones respecto a la cantidad de P total en el horizonte Ah para muestras a humedad de campo (A), muestras secadas al aire (B) y muestras con tratamiento térmico a 300°C (C).

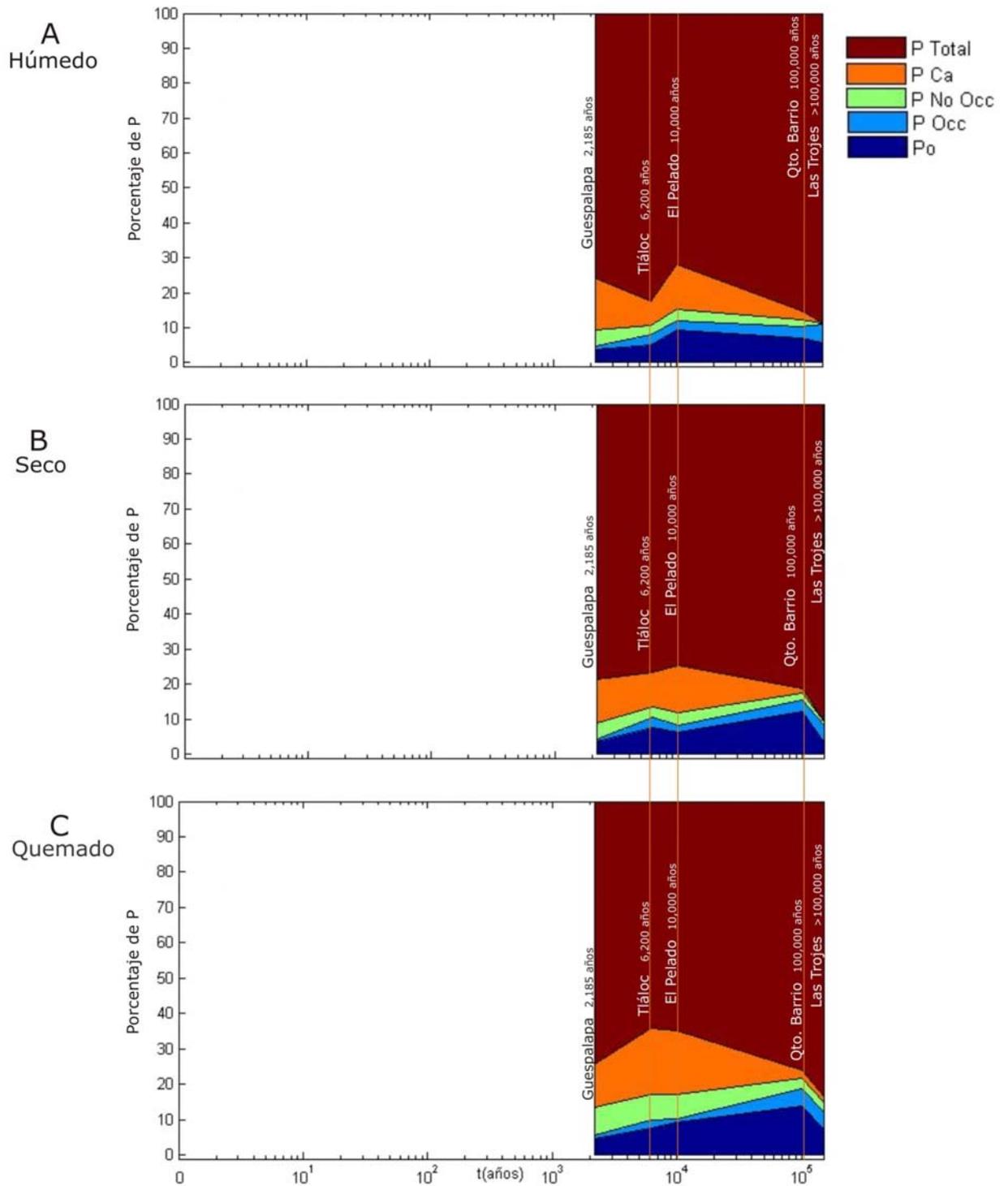


Figura 22. Porcentaje de las fracciones respecto a la cantidad de P total en el horizonte Bw para muestras a humedad de campo (A), muestras secadas al aire (B) y muestras con tratamiento térmico a 300°C (C).

8.6. Correlaciones entre las diferentes fracciones de P y las propiedades de los suelos

A continuación se analiza la correlación entre: (1) las fracciones de P_o y P_i extraído con $NaHCO_3$, $NaOH$ y HCl concentrado así como la obtenida con la RII (P resina) y (2) las fracciones de P (P_o , P_{Ca} , $P_{No\ Occ}$, P_{Occ}) con las propiedades generales de las muestras planteadas en la Tabla 2 (Ver anexos XII-XV). Las mayores correlaciones (r : 0.78-0.98) se encontraron entre las fracciones orgánicas e inorgánicas de P ($P_i\ NaOH$, P_{Occ} , $P_o\ NaOH$ y P_o) y las concentraciones de Fe extractable con oxalato, es decir, con los óxidos amorfos de Fe (Figura 23). Además, la fracción de P relacionada con la materia orgánica humificada del suelo (P_o) está correlacionada con el Al presuntamente proveniente de arcillas minerales tipo alofano (Al_o - Al_d) ($r = 0.93$, $p = 0.0005$) en las muestras secas y tratadas térmicamente a $300^\circ C$ (Figura 24A), como con el Fe que está formando complejos con la materia orgánica humificada (Fe_p) (r : 0.78-0.80), en las muestras húmedas y quemadas, respectivamente (Figuras 24C y 24B). El porcentaje de fijación de P se correlacionó con la fracción ocluida del P en las muestras que conservaron su humedad de campo ($r = 0.86$, $p = 0.028$) en la Figura 25A. Éstas además están correlacionadas con el C orgánico total ($r = 0.85$, $p = 0.034$) en la Figura 25B. En las muestras quemadas se observa una correlación entre la fracción de P orgánico (P_o) con el porcentaje de fijación de P del suelo. Sólo en las muestras que se conservaron a humedad de campo se observa una correlación entre el pH del suelo y el P_i extraído con la RII (P_{RII}), así como entre el pH del suelo y la fracción de P no ocluido.

En contraste, en las muestras de los horizontes B_w se encontró una buena correlación, pero negativa, entre el Fe proveniente de óxidos cristalinos (Fe_d) y la fracción de P inorgánico extraída con $NaOH$ (Figura 26A) así como del la fracción de P no ocluido (Figura 26B). El Al asociado al alofano (Al_o - Al_d) está correlacionado con la fracción de P orgánico (P_o) extraído con $NaOH$ y a las fracciones de P_o total en los tres tratamientos. Los óxidos de Al y Fe amorfos (Al_o , Al_o - Al_p y Fe_o - Fe_p), el C y el N presentaron una correlación con la fracción del P orgánico (P_o) en las muestras que fueron quemadas a $300^\circ C$ y en las muestras que se secaron al aire. Es de mencionar que la fracción de P ocluida sólo se correlacionó en las muestras que conservaron la humedad de campo con el alofano o con óxidos de Al tanto en su etapa amorfa como en su etapa cristalina con $p > 0.05$ que nos indican que no son estadísticamente significativos (Figura 27). El P extraído con HCl concentrado sólo presenta una correlación con la CIC en el horizonte B_w y con el Al_p en el horizonte B_w .

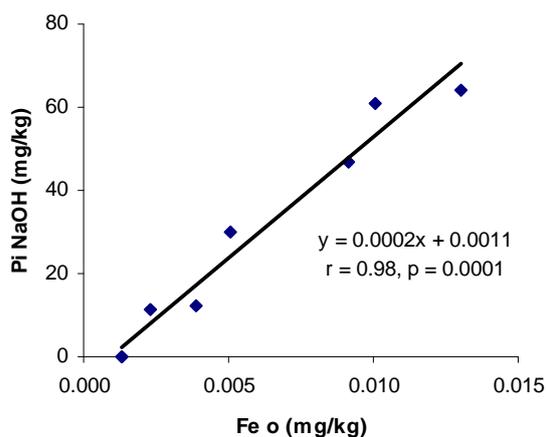
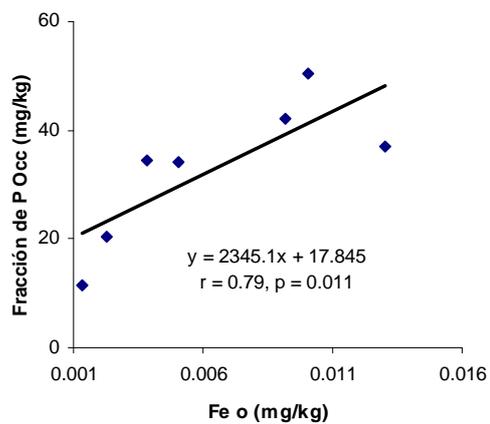
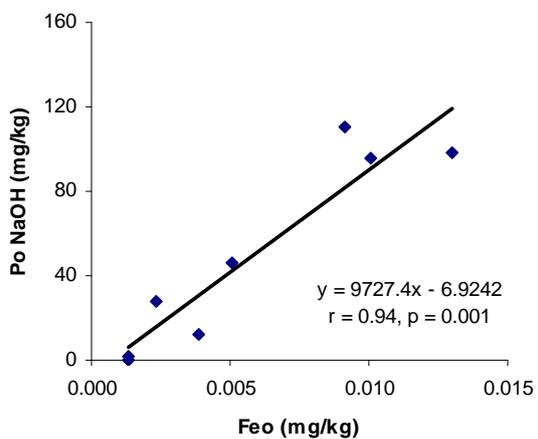
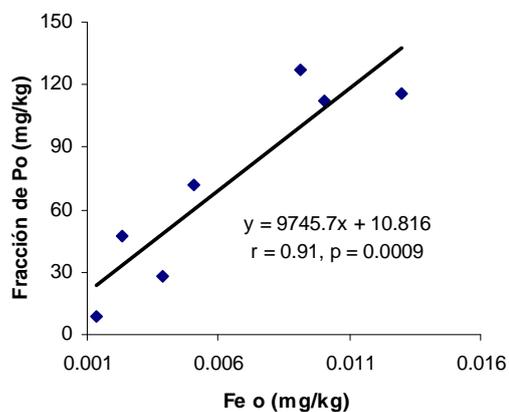
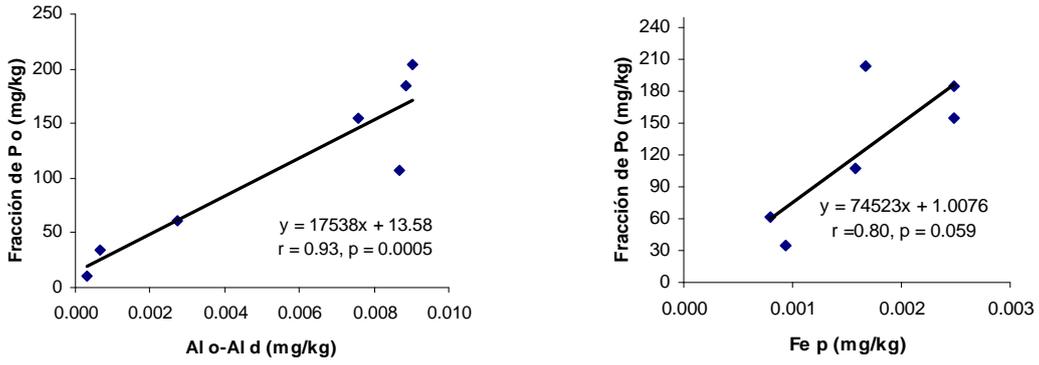
A**B****C****D**

Figura 23. Correlación del Fe extractable con oxalato (asociado a óxidos amorfos de Fe, Fe_o) con diferentes fracciones de P: (A) Pi extraído con NaOH, (B) Fracción de P Occ (modelo de Walker y Syers, 1976), (C) Po obtenido de la extracción con NaOH y (D) Fracción de Po (modelo de Walker y Syers, 1976) del horizonte Ah de las muestras secadas al aire.

A**B**



C

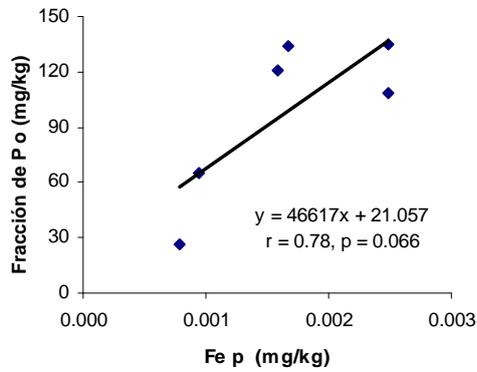
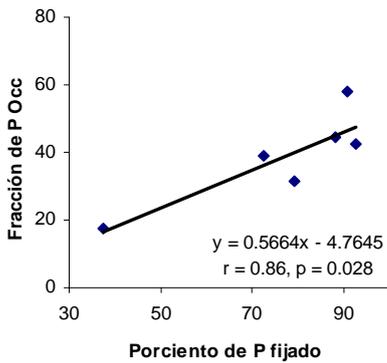


Figura 24. Correlación de la fracción de Po (modelo de Walker y Syers, 1976) con: (A) Al asociado al alofano (Al o –Al d) en muestras quemadas, (B) Fe asociado a organo-minerales (Fe p) en muestras quemadas y (C) Fe asociado a organo-minerales (Fe p) en el horizonte Ah de muestras secadas al aire.

A



B

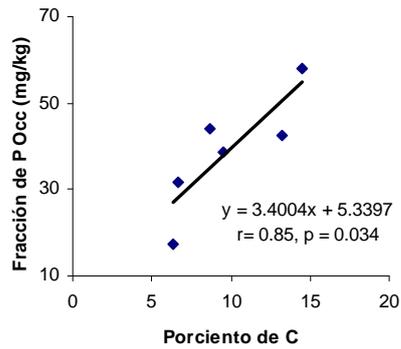
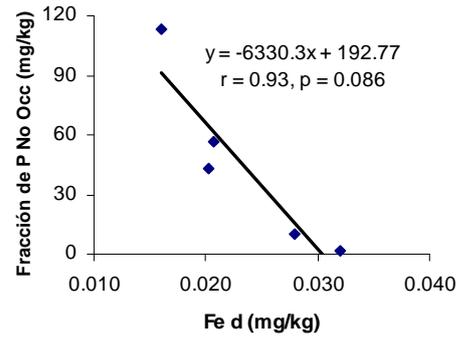
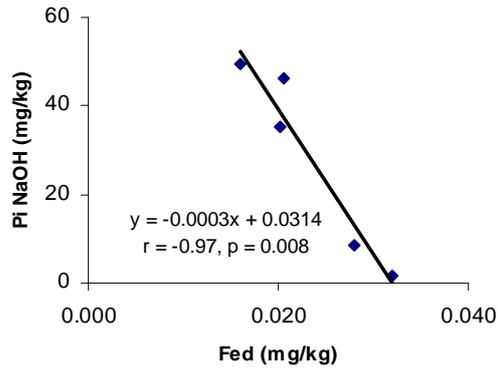


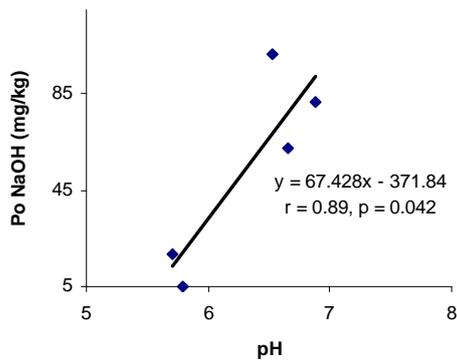
Figura 25. Correlación entre la fracción de P Occ (modelo de Walker y Syers, 1976) con: (A) Porcentaje de P fijado, (B) Porcentaje de carbono en muestras húmedas en el horizonte Ah.

A

B



C



D

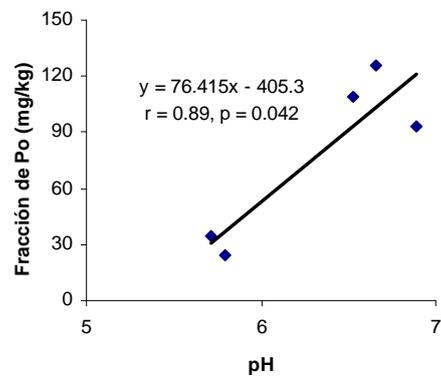
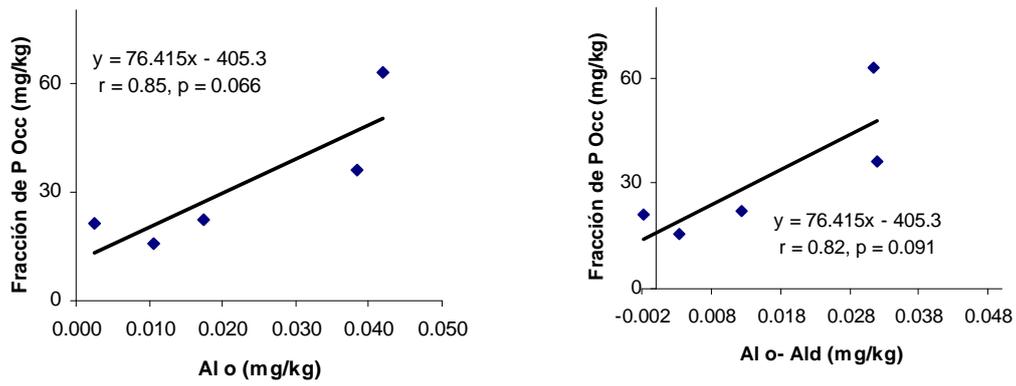


Figura 26. Correlación del Fe extractable con ditionito (Fed) con (A) el Pi extraído con NaOH y con (B) el P No Occ (modelo de Walker y Syers, 1976); y correlación del valor pH del suelo con (C) el Po obtenido de la extracción con NaOH y con (D) la fracción de Po(modelo de Walker y Syers, 1976) del horizonte Bw de las muestras que se conservaron a humedad de campo.

A

B



C

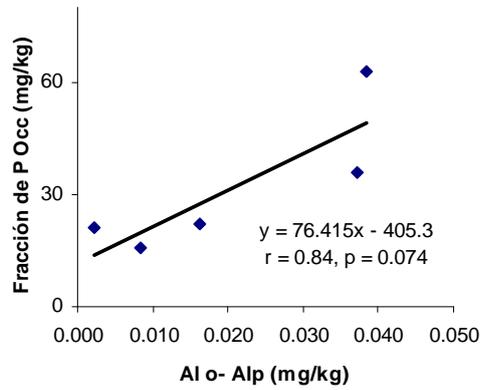


Figura 27. Correlación de la fracción de P Occ (modelo de Walker y Syers, 1976) con: (A) Al de minerales de bajo orden estructural (Al o), (B) Al asociado a alofano (Al o- Al d) y (C) Al asociado arcillas en su etapa cristalina (Al o- Al p) en horizontes Bw de muestras húmedas.

9. Discusión

Los objetivos de esta tesis fueron evaluar el efecto de la desecación y de la quema (tratamiento térmico a 300° C) de los suelos en el P solubilizado con diferentes reactivos, recomendados para realizar una separación química de este elemento, estudiar la contribución de la depositación de tefras frescas en la fracción de P biodisponible, analizar cómo evolucionaban las fracciones de P en una cronosecuencia suelos volcánicos (60 a >100,000 años) e identificar el comportamiento del P disponible a medida que la edad de los materiales es mayor. Además se investigó la eficiencia del método de fraccionamiento de P en estos suelos volcánicos. A continuación se discuten los resultados obtenidos para cada uno de los objetivos.

9.1. Muestras húmedas y desecadas

Las muestras que mantuvieron su humedad de campo no tuvieron un cambio evidente en la cantidad de P que se extrajo al ser comparadas con las muestras que fueron secadas al aire, tanto las de los horizontes Ah como en las de los horizontes Bw. Las fracciones PCa, P No Occ, P Occ y Po mostraron un comportamiento similar en toda la cronosecuencia. Otros autores (Etchevers, 1986; Schalscha *et al.*, 1965) han encontrado que secar las muestras al aire sí modifica la cantidad de P extraíble en comparación con muestras analizadas a humedad de campo y atribuyeron esto al aumento de labilidad que experimentaría la fracción orgánica del P por efecto de la mineralización. Debe considerarse que en ambos casos sólo se trabajó con la fracción extraíble y no es posible comparar esos resultados con datos obtenidos en un fraccionamiento secuencial.

9.2. El efecto de la quema (tratamiento térmico a 300° C)

De los tres pretratamientos que se le efectuaron a las muestras (humedad de campo, secado al aire y quemado o tratado térmicamente a 300° C en la mufla), el que simulaba un incendio forestal aumentó la disponibilidad de P, sobre todo en los horizontes superficiales de suelos con edades intermedias (1,000-10,000 años). Este incremento del P biodisponible quizás sea el responsable del mayor crecimiento de las plantas observada tras los incendios (Mataix, 1999). También se presentó una mayor cantidad de P en la fracción P Ca (asociado a minerales primarios como la apatita) en los suelos del Popocatepetl y del Pelado. La quema parece oxidar la materia orgánica del suelo y transforma el Po en Pi (óxidos de P) que al reaccionar con el agua del suelo

forma ácido fosfórico (Kutiel y Shaviv, 1989; Saa *et al.*, 1993) el cual en medio acuoso se disocian de acuerdo a sus constantes respectivas para formar H_2PO_4^- o HPO_4^{2-} , dependiendo del pH de la solución. Una parte de este P liberado queda en formas relativamente solubles y es extraíbles con RII, NaHCO_3 o NaOH (P No Occ), mientras que otra parte pasa a estar en formas inorgánicas que sólo logran extraerse con HCl 1M.

9.3 Efecto de la depositación de tefras frescas en la disponibilidad del P

Las tefras frescas contienen P (157.97 g/m^2), el cual se encuentra predominantemente (>90%) en formas que no pudieron ser extraídas por las soluciones utilizadas en el método del fraccionamiento de P, por ejemplo inclusiones de cristales de apatita dentro de otros minerales (Hedley, 1982; Tiessen y Moir, 1993). No obstante, en la etapa donde se utilizó la RII se logró extraer lo equivalente a 0.94 g/m^2 de la muestra seca al aire y 1.74 g/m^2 de la muestra quemada en la mufla a 300°C . Lo anterior indica que la erupción del Parícutín bien pudo haber mejorado la disponibilidad de P para las plantas en lugares que recibieron aportes de ceniza, ya que sus tefras contienen P en formas aprovechables por las plantas. Además es posible que en los sitios que se incendiaron a consecuencia de la erupción, la disponibilidad de P haya mejorado adicionalmente por el efecto de la quema. Con lo anterior se confirma la hipótesis planteada por los investigadores del Tree Ring Laboratory (comunicación personal Michael Ort) de que las mayores concentraciones de P determinadas en los anillos de crecimiento de árboles de pino de la zona están relacionadas, por lo menos en parte, con el aporte de P disponible con las tefras. Es necesario calcular balances de masa para saber si los aportes de las tefras y la potencial movilización de P por posibles quemas explican la mayor parte del incremento de P observado en los troncos de los árboles.

9.4. Evolución de las fracciones de P a lo largo de la cronosecuencia

El modelo de Walker y Syers (Figura 7) predice que el P total disminuye con el tiempo, al igual que el P relacionado a minerales primarios, mientras que el P orgánico aumenta hasta edades de la superficie de 22,000 años y luego disminuye ligeramente, mientras que el P ocluido tiende a aumentar con el tiempo. El P no ocluido, dentro del cual se encuentra el P disponible, disminuye con el tiempo.

Los resultados de esta investigación muestran que tanto en los horizontes Ah como en los horizontes Bw la suma de fracciones de P disminuye con el tiempo en concordancia con el modelo de evolución de fracciones de P establecido por Walker y

Syers (1976) y con lo establecido ya por otros autores (Crews *et al.*, 1995; Johnson *et al.*, 2003). Esto es particularmente evidente a partir de los 6,200 años de edad.

En las tefras frescas y en los suelos volcánicos jóvenes, la fracción de P dominante está asociada a minerales de apatita, los cuales pueden encontrarse incluidos en otros minerales primarios que deben disolverse primero para que pueda iniciarse el proceso de movilización del P contenido en ese mineral (Oliva *et al.*, 2004; Boyle, 2007). Siebe *et al.* (2004) encontraron que la concentración de P_2O_5 en las lavas de conos volcánicos de la Sierra del Chichinautzin es relativamente alta (0.3-0.6 % en Guespalapa) y que el P se encuentra en forma de inclusiones de apatita dentro de piroxenos, plagioclasas y fenocristales de hornblenda. En comparación con estos datos, los contenidos de P en los piroclastos del Paricutín es menor (0.91%). Koritnig (1965) y Cescas *et al.* (1970) mencionan que entre el 2 y el 10% del P puede encontrarse en las estructuras de silicatos primarios, los cuales son de gran resistencia al intemperismo sobre todo en rocas ígneas y metamórficas.

La fracción de P relacionada con la apatita (P Ca) mostró un comportamiento similar al predicho en el modelo de Walker y Syers (1976), es decir, una disminución con el tiempo. Sin embargo, en el presente estudio resultó notable que los suelos de mayor grado de desarrollo (>100,000 años) aún contienen importantes cantidades de P asociado a minerales primarios como apatita (1-8%), mientras que Walker y Syers proponen que esta fracción desaparece prácticamente después de 22,000 años.

La extracción con la RII, que muestra parte de la fracción de P No Occ, permitió identificar que la mayor disponibilidad de P en la cronosecuencia se encuentra entre los 1,000 y 10,000 años. Es de suponerse que con las resinas se extraen iones de ortofosfato que se encuentran en la solución del suelo. En suelos más antiguos, como en las muestras de Quinto Barrio y Las Trojes, estos iones ($H_2PO_4^-/HPO_4^{2-}$) posiblemente fueron inmovilizados por los microorganismos, adsorbidos por el alofano o precipitados por los óxidos de Fe y Al.

Tabla 8. Datos de P disponible en la cronosecuencia de muestras tratadas de los horizontes Ah y Bw, y P Bray así como P contenido en alicuotas (hojas) de los árboles de las zonas estudiadas.

		Horizonte Ah			Horizonte Bw		
Suelos húmedos							
Sitio	Edad años	RII g/m ²	NaHCO ₃ g/m ²	NaOH g/m ²	RII g/m ²	NaHCO ₃ g/m ²	NaOH g/m ²
Popocatepetl	1000	4.54	0.36	0.93	-	-	-
Guespalapa	2185	4.18	0.24	3.45	5.12	0.00	3.98
Tlálloc	6200	1.34	0.13	2.76	0.43	0.07	2.15
El Pelado	10000	1.69	0.16	2.75	0.43	0.15	2.58
Quinto Barrio	100000	0.54	0.09	0.00	0.13	0.00	0.68
Las Trojes	>100000	0.88	0	0.96	0.00	0.00	0.18
Suelos secos							
Sitio	Edad años	RII g/m ²	NaHCO ₃ g/m ²	NaOH g/m ²	RII g/m ²	NaHCO ₃ g/m ²	NaOH g/m ²
Paricutín	0	0.97	0.00	0.00	-	-	-
Paricutín	60	1.53	0.00	0.00	-	-	-
Popocatepetl	1000	7.79	0.42	0.95	-	-	-
Guespalapa	2185	4.19	0.24	4.12	4.97	0.00	3.72
Tlálloc	6200	1.79	0.10	2.06	0.64	0.00	2.03
El Pelado	10000	2.43	0.20	2.74	0.83	0.00	2.61
Quinto Barrio	100000	0.65	0.10	1.54	0.00	0.00	0.82
Las Trojes	>100000	0.42	0.00	1.02	0.22	0.00	0.15
Suelos quemados							
Sitio	Edad años	RII g/m ²	NaHCO ₃ g/m ²	NaOH g/m ²	RII g/m ²	NaHCO ₃ g/m ²	NaOH g/m ²
Paricutín	0	1.74	0.00	0.00	-	-	-
Paricutín	60	1.38	0.00	0.00	-	-	-
Popocatepetl	1000	8.59	0.00	0.63	-	-	-
Guespalapa	2185	13.14	0.25	3.72	11.12	0.28	3.97
Tlálloc	6200	8.22	0.09	3.49	4.12	0.07	2.94
El Pelado	10000	9.41	0.15	3.27	6.25	0.11	0.26
Quinto Barrio	100000	2.24	0.06	2.21	0.15	0.00	1.09
Las Trojes	>100000	0.58	0.08	1.95	0.13	0.00	0.97
P Bray (g/m²)^a							
Paricutín	0	-	-	-	-	-	-
Paricutín	60	-	-	-	-	-	-
Popocatepetl	1000	10.21	-	-	-	-	-
Guespalapa	2185	0.55	-	-	0.32	-	-
Tlálloc	6200	0.13	-	-	-	-	-
El Pelado	10000	0.23	-	-	0.02	-	-
Quinto Barrio	100000	0.05	-	-	0.09	-	-
Las Trojes	>100000	0.36	-	-	0.02	-	-
P en alicuotas de <i>Pinus Montezumae</i> (mg/g)^b							
Popocatepetl	1000	1.61	-	-	-	-	-
Guespalapa	2185	1.65	-	-	-	-	-
Tlálloc	6200	1.69	-	-	-	-	-
El Pelado	10000	1.57	-	-	-	-	-
Quinto Barrio	100000	1.35	-	-	-	-	-
Las Trojes	>100000	1.11	-	-	-	-	-

^{a y b} Datos obtenidos de Peña (en proceso).

Peña (tesis doctoral en proceso) analizó el contenido de P en hojas de *Pinus Montezumae* y encontró suficiente cantidad de P en las hojas, lo que coincide con el comportamiento del P extraído con la RII (Tabla 8). Sólo las hojas de árboles colectadas

en Las Trojes mostraron bajos contenidos de P. Este autor, también realizó análisis de P disponible en los suelos con el método de Bray-Kurtz (extracción en medio ácido con NH_4F) y encontró concentraciones de P disponible con un orden de magnitud menor a las que se extrajeron en el presente trabajo con la RII, sobre todo en suelos con propiedades ándicas.

El NaHCO_3 extrajo la parte restante de la fracción inorgánica del P disponible (Campo *et al.*, 2001). Esta fracción simula la acción de las raíces (la respiración) y es capaz de movilizar una pequeña fracción de P (Tiessen y Moir, 1993).

La extracción con NaOH que representa el resto de la fracción P No Occ (Tiessen y Moir, 1993; Crews 1995), muestra que parte de este P puede ser desorbido de la superficie del alofano o liberada de los hidróxidos o óxidos de Fe y/o Al en forma de P lábil para las muestras de sitios como El Popocatépetl o El Pelado, y hacerlo disponible para las plantas, pero en los suelos más antiguos es posible que esta fracción de P se haya ocluido como lo propone Walker y Syers (1976).

Las fracciones Po y P Occ se mantienen constantes (la segunda fracción en menor cantidad) pese a que se esperaría que tuvieran un aumento con la edad del material, la cual a su vez debería estar relacionada con una disminución de las fracciones P Ca y P No Occ como lo plantean Walker y Syers (1976) o autores como Crews *et al.* (1995).

9.5. Eficiencia del método de fraccionamiento de P

Autores como Crews *et al.* (1995), que han realizado fraccionamientos de P en suelos, suponen que el P total es equivalente a la suma de las fracciones. En este trabajo se determinó el contenido de P total en alícuotas independientes de los sustratos analizados por FRX, con lo cual se pudo mostrar que el fraccionamiento no extrae al P exhaustivamente. La menor proporción entre P extraído con el fraccionamiento y P total se obtuvo en las tefras (3%) y los suelos del Paricutín (4%), seguida por los suelos de mayor grado de desarrollo (Quinto Barrio (15-31%) y Las Trojes (12-25%)). En los suelos de edades jóvenes a intermedias (1,000-10,000 años) se logró extraer la mayor proporción de P, sobre todo de las muestras tratadas térmicamente a 300° C; sin embargo, ésta no rebasó el 39% del P total. Lo anterior muestra que el fraccionamiento (Hadley, 1982; Tiessen y Moir, 1993) no es suficientemente eficiente para remover las

fracciones de P más recalcitrantes, ni de materiales parentales jóvenes, ni de suelos volcánicos con avanzado grado de desarrollo.

El fraccionamiento no es capaz de extraer la totalidad del P orgánico ya sea en su forma lábil o en su forma recalcitrante como tampoco a la fracción de P ocluido que se encuentra en óxidos e hidróxidos hidratados o en minerales secundarios tipo alofano. Una evidencia de esto es que las muestras tratadas térmicamente a 300° C logran mejorar significativamente la extracción del P pues al quemarse la materia orgánica, el P que estaba asociado a ésta se libera debido a la oxidación de la materia orgánica. Pero también podemos suponer que las altas temperaturas provocan el colapso de minerales secundarios como el alofano y los óxidos e hidróxidos de Fe y Al pobremente cristalizados, con lo cual queda más disponible el P ocluido o adsorbido a éstos. Autores como Crews *et al.* (1995) comentan en la discusión del método, que el fraccionamiento no es específico en la extracción de las fracciones más recalcitrantes. Sin embargo, ellos sí logran extraer una proporción considerable de Po y P Occ en muestras de suelos con edades de 300 a 4.1×10^6 años. En este estudio se muestra que el fraccionamiento no es selectivo para estas fracciones, ni siquiera tratando térmicamente la muestra previamente en la mufla como lo sugiere Miehlich (1991), pues la correlación entre el contenido de carbono y el Po es muy baja, incluso en horizontes Ah. Además se observa una importante proporción de Po en los horizontes Bw, similar a la de los horizontes Ah, aunque los horizontes Bw son pobres en materia orgánica. Lo anterior indica que probablemente el método de fraccionamiento no logra separar eficientemente al Pi en la extracción con NaOH y HCl concentrado, ya que el NaOH está disolviendo no sólo a la materia orgánica, sino también a los minerales con bajo orden estructural.

La extracción con ácidos concentrados que se realiza al final del fraccionamiento no es capaz de disolver al P restante contenido en los minerales. Para lograrlo se tendría que adicionar una digestión con ácido fluorhídrico al final del fraccionamiento, debido a que éste tiene mayor grado de acidez que el HCl y el H₂SO₄ y es capaz de disolver a los silicatos.

El método de fraccionamiento de P se vio favorecido al hacer la determinación de cada una de las fracciones de P que se extrajeron por ICP-OES, por existir un límite de detección bajo y una reproducibilidad del mismo que permitió identificar la mínima existencia de P asociado a los minerales primarios como la apatita en tiempos >100,000 años, depurando el método.

10. Conclusiones

Al comparar las muestras que se secaron al aire con las muestras que conservaron su humedad de campo, se observa que ambas tienen un comportamiento similar en todas las fracciones de P de la cronosecuencia, por lo que no existe un aumento significativo en la fracción no ocluida o una disminución notoria en la proporción de P ocluido.

Al exponer los suelos a un tratamiento térmico a 300°C (quema), simulando un incendio forestal, el estudio mostró que existe un aumento de la cantidad de P extraíble como se esperaba, especialmente en las fracciones de P disponible y P extractable HCl 1M.

Las muestras de la tefra fresca del Parícutín aportan una pequeña fracción de P biodisponible, la cual aumenta si las muestras se someten a un tratamiento térmico a 300°C. Lo anterior pudiera explicar el incremento de P en anillos de *Pinus* datados en las fechas de actividad volcánica (1943-1952).

Los suelos volcánicos con edades de 0 a > 100,000 años del sector central de la FVTM mostraron en el fraccionamiento de P un comportamiento, en general, similar al que plantea el modelo de Walker y Syers (1976), puesto que la cantidad de P total disminuye al incrementar el tiempo igual que la suma de fracciones de P para los horizontes Ah y Bw. En lo particular, el P que se encuentra asociado a la materia orgánica permanece constante después de los 10,000 años como lo plantea el modelo de Walker y Syers (1976) a diferencia de la fracción de P ocluido, la cual permanece constante en toda la cronosecuencia con cantidades de P bajas, incluso en los suelos más antiguos como Quinto Barrio y las Trojes (~100,000 años).

La fracción de P que se encuentra disponible para las plantas está presente en cantidades aparentemente suficientes en toda la cronosecuencia, menos en el sitio con suelos más desarrollados (Las Trojes). Los suelos con edades intermedias (6,200 a 10,000 años) son los que mostraron tener la mayor cantidad de P disponible.

Se verificó un comportamiento similar de la fracción de P relacionada con la apatita (P Ca) al del modelo de Walker y Syers (1976); sin embargo en este estudio los suelos de mayor grado de desarrollo (>100,000 años) aún contienen importantes cantidades de P asociado a minerales primarios como apatita, mientras que Walker y Syers proponen que esta fracción desaparece prácticamente después de 22,000 años.

A diferencia de lo que se esperaba, el P orgánico no se correlacionó ni con la materia orgánica ni con los contenidos de Al extractable con pirofosfato sino más bien

con el Fe extraíble con pirofosfato y con el alofano. La fracción ocluida si mostró una correlación con los contenidos de Al y Fe extractables con oxalato (asociados a minerales de bajo orden estructural cristalinos), pero también con la materia orgánica, lo que nos conduce a pensar que la separación de estas fracciones no se logra satisfactoriamente con el método utilizado.

En relación al método de fraccionamiento de P utilizado en este estudio se concluye que:

- Se logró extraer como máximo un 39.21% del P total en la muestra quemada del horizonte Ah del suelo volcánico Popocatepetl (1000 años de edad).
- El método de Tiessen y Moir (1993) no es capaz de extraer el P contenido ni en tefras recientes ni en suelos muy jóvenes de las muestras del Parícutín (0-60 años).
- El fraccionamiento no extrae exhaustivamente ni hace una separación precisa de las fracciones del P orgánico y del ocluido en minerales de bajo orden estructural.

11. Referencias

Blume, H.P. y Schwertmann , U, 1969. Genetic evolution of profile distribution of aluminium, iron and mangamese oxides. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 33: 438-444.

Boyle, J., 2007. Loss of apatite caused irreversible early-Holocene lake acidification. *The Holocene*, 17(4): 543-547.

Brady, N., 1996. *The nature and Properties of Soils*. Prentice Hall. Pp 593-621.

Campo, J., M. Maas, V. J. Jaramillo, A. Martínez, J. Sarukhán, 2001. Phosphorus cycling in a Mexican tropical dry forest ecosystem. *Biogeochemistry*, 53: 161-179.

Campo, J., 2003. Disponibilidad y flujo de nutrimentos en una toposecuencia con bosque tropical seco en México. *Agrociencias*, 37(2): 211-219.

Carreira, J. A., F. X. Niell, 1995. Mobilization of nutrients by fire in a semiarid Gorse-Scrubland ecosystem of southem Spain. *Aris Soil Res. Rehab.*, 9:73-89.

Cescas, M. P., E. H Tyner and J. K. Syers, 1970. Distribution of apatite and other mineral inclusions in a rhyolitic pumice ash and beach sands from New Zealand: an electron microprobe study. *J. Soil Sci.*, 21: 78-84.

Chang, S. C. and M. L. Jackson, 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci*, 84: 133-144.

Chistensen N. L. 1985. Shrubland fire regimes and their evolutionary consequences. En: Pickett S. T. A. y White P.S. Eds. *The ecology of natural Disturbance and Patch dynamics*, Academic Press, Orlando, Florida. Pp 85-100.

CONAFOR, 2006. Incendios forestales y deforestación en México: una perspectiva analítica. www.cce.org.mx/cespedes/publicaciones/otras/deforestacion/introduc.htm.

Crews, T. E., K. Kitayama, J. H. Fownes, R. H. Riley, D. A. Herbert, D. Mueller-Dombois, P. M. Vitousek, 1995 Changes in soil phosphorus fractions and ecosystem dynamic across a long chronosequence in Hawaii. *Ecology*, 76(5): 1407-1424.

Cruz, H. L., K. D. Geissert, 2000. Carga eléctrica de los Andosoles del Cofre de Perote, Veracruz, México. *Terra*, 18(2): 115-124.

Demant, A., 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista Instituto de Geología*, 2: 172-187.

Etchevers G. G., J. D. Etchevers, I. Montes, S. Infante, 1984. Determinación colorimétrica de P disponible utilizando tres sistemas reductores del complejo fosfomolibdico. *Agrociencias*, 55: 45-57.

Etchevers, J. D., 1986. Chemical soil analysis the reason for their drawbacks. In proceedings of an International Workshop on the Laboratory Methods and Data Exchange Program. (Ed, L. K. Pleijsier) Pp 16-34 (technical Paper/ International Soil Reference and Information Center, Labex Secretariat: The Netherlands).

García, D. A., 1998. Análisis integrado de paisajes en el Occidente de la cuenca de México (la vertiente oriental de la sierra de Monte alto y monte bajo). Universidad Complutense de Madrid, España. Tesis doctoral. Pp 245-295.

Havlin, J. L., 1999. Soil fertility and fertilizer: an introduction to nutrient management. Prentice- Hall. New Jersey, E.U.A. Pp 154-195.

Hedley, M. J., W.B. Stewart, B. S. Chauhan, 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of American Journal*, 46: 970-976.

Jahn, R. y K. Stahr., 1996. Development of soil and site qualities on basic volcanoclastics with special reference to semiarid environment of Lanzarote, Canary Islands, Spain. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13 (1): 104-112.

Johnson, A. H., J. Frizano, D.R. Vann, 2003. Biogeochemical implications of labile phosphorus in forest soils determined by Hedley fractionation procedure. *Oecologia*, 135: 487-499.

Khanna, P. K., R. J. Raison, 1986. Effect of fire intensity on solution chemistry of surface soil under a *Eucalyptus pauciflora* forest. *Aust. J. Soil Res.* 24:423-434.

Khouri, E., 2005. Dinámica del fósforo en suelos cálcicos de áreas mediterráneas: trabajo experimental. Cuadernos de Investigación. Universidad de Oviedo, España. Pp 1-91.

Koritnig, S., 1965. Geochemistry of phosphorus, I. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 29:361-371.

Kutiel, P., H. Kutiel, 1989. The effect of a wildfire on soil nutrients and vegetation in an Aleppo pine forest on mount Carmel, Israel. *Pirineos*, 134:59-74.

Kuo, S., 1996. Phosphorus Soil Science of American Society of Agronomy, 677 S Segoe Rd., Madison, WI 53711, USA. *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods-SSSA-Book Series no. 5.*

Kutiel, P., A. Shaviv, 1989. Effect of heating on phosphate sorption and availability in some North-East Nigerian Soils. *J. Soil Sct.* 42:381-388.

Lynham, T. J. G. M. Wickware, J.A. Mason, 1998. Soil chemical change and plant succession following experimental burning in immature jack pine. *Can J. Soil Sct.* 78: 93-104.

Mataix- Solera, J., 1999. Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos afectados por incendios forestales. Contribución a su conservación y regeneración. Universidad de Alicante, España. Pp 43.

Miehlich, G. 1980. Los suelos de la Sierra Nevada de México. *Suplemento Comunicaciones VII, Proyecto Puebla-Tlaxcala, Fundación Alemana para la Investigación Científica*. 206 pp.

Miehlich, G. 1991. *Chronosequences of volcanic ash soils*. Hamburger Bondenkundliche Arbeiten 15. Hamburgo, Alemania. 207 pp.

Miller, J. N., J. C. Miller, 1993. *Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry* Pearson (Prentice Hall) 3rd edition. England. 129-146.

Murphy, J., J.P Riley, 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27: 31–36.

Nanzyo, N., 2002. Unique properties of volcanic ash soil. *Global Environmental Research-English Edition*, 6(2):99-112.

Olsen, S. R., and L.E. Sommer, 1982. Phosphorus. In A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney, editors. *Methods of soil analysis (Part 2)*. Second edition. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.

Oliva, P., B. Dupré, F. O. Martin, J. E. Viers, 2004. The role of trace minerals in chemical weathering in a high-elevation granitic watershed (Estivère, France): Chemical and mineralogical evidence. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68 (10): 2223–2244.

Ortega, F., M. E. Herrera, M. G. Dávalos-Elizondo, 2008. On the nature and role of the lower crust in the volcanic front of the Trans-Mexican Volcanic Belt and its fore-arc region, southern and central Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25(2): 346-364.

Pasquaré, G., L. Ferrari, V. Garduño, A. Tibaldi, L. Vezzoli, 1991. *Geology of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacan*. Boulder, CO, Geological Society of America, Map and Chart Series MCH072, 1 mapa con texto, Pp 22.

Peña V. Dinámica de la calidad de sitio a través de una cronosecuencia volcánica y sus implicaciones para la productividad forestal y la restauración ecológica. Instituto de Geología UNAM Tesis doctoral del Posgrado en Ciencias Biológicas (en proceso).

Peña, V. and Ch. Siebe, 2005. Site quality changes in a volcanic chronosequence at the transmexican volcanic belt. Proceedings of the International Conference on Soil Global Change, México, D. F, March, 2005. IUSS-SMCS- CP-UNAM, 58. pp.

Peña, D. y C. Zebrovsky., 1992. Estudio de los suelos volcánicos endurecidos (Tepetates) de las cuencas de México y Tlaxcala (México). Informe del mapa morfopedológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. ORSTOM-Colegio de Postgraduados, Commission des Communautés Européennes Contrat CCE/ORSTOM No. TS2-0212.

Raison, R. J., 1979. Modification of the soil environment by vegetation fires, with particular referent to nitrogen transformations: a review. *Plant soil*, 51: 73-108.

Saa, A., M.C. Trasar-Cepeda, F. Gil-Sotres, T. Carballas, 1993. Changes in soil phosphorus and acid phosphatase activity immediately following forest fires. *Soil Biol. Biochem.* 16:177-183.

Schalscha, E. B., C. González, I. Vergara, G. Galindo, A. Schatz, 1965. Effect of drying on volcanic ash soils in Chile. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29:481-482.

Schlichting E., H.-P. Blume y K. Stahr, 1995: *Bodenkundliches Praktikum: eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte und für Geowissenschaftler.* Pareys Studentexte 81, 2., neubearb. Aufl. - Berlin, Oxford.

Semarnat, 2002. Unidades de suelos dominantes en México.

Shoji, S., M. Nanyo, R.A. Dahlgren, 1993. Volcanic ash soils-genesis, properties and utilization. *Developments in Soil Science* 21, Elsevier, Amsterdam. Pp 217-222.

Siebe, Ch, G. Bocco, Sánchez-Espinoza, J. F. y A. Velásquez, 2003. Capítulo 7: Suelos: Distribución, características y potencial de uso. En: Velázquez, A., A. Torres y G. Bocco: Las enseñanzas de San Juan. Investigación participativa para el manejo integral de los recursos naturales. Instituto Nacional de Ecología, Dirección de Publicaciones.

Siebe C., V. Rodríguez-Lara, P. Schaaf and M. Abrams, 2004. Geochemistry, Sr–Nd isotope composition, and tectonic setting of Holocene Pelado, Guespalapa and Chichinautzin scoria cones, south of Mexico City. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 130(3-4): 197-226.

Siebe, C., L. Arana-Salinas and M. Abrams. 2005. Geology and radiocarbon ages of Tlaloc, Tlacotenco, Cuauhtzin, Hijo del Cuauhtzin, Teuhtli, and Ocusacayo monogenetic volcanoes in the central part of the Sierra Chichinautzin, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 141(3-4): 225-243.

Solomon, D., J. Lehmann, T. Mamo, F. Fritzsche, W. Zech, 2002. Phosphorus forms and dynamics as influenced by land use changes in the sub-humid Ethiopian highlands *Geoderma*, 105: 21–48.

Szynkaruk, E., V.Garduño-Monroy, G.Bocco, 2004. Active fault systems and tectono-topographic configuration of the central Trans-Mexican volcanic belt. *Geomorphology*, 61: 111-126.

Tiessen, H. and J. O. Moir, 1993. Characterization of available P by sequential extraction. M. R. Carter (Editor), *Soil sampling and methods of analysis*. Louis, Boca Raton, Florida, USA Pp 75-86.

van Reewijk, L.P. (ed.) 1995. *Procedures for soil analysis*. Technical Paper No 9. International Soil Reference and Information Centre, Wageningen, The Netherlands.

van Reewijk, L.P. (ed.) 1992. *Procedures for Soil Analysis*. International Soil Reference and Information Centre, Wageningen 12-7.

Walker, T. W. and J. K. Syers, 1976. The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, 15: 1-19.

Werner, G., 1978. Los suelos de la Cuenca Alta de Puebla-Tlaxcala y sus alrededores. Suplemento Comunicaciones VI, Proyecto Puebla-Tlaxcala, Fundación Alemana para la Investigación Científica Pp 95.

Williams, J. D. H. and T. W. Walker, 1969. Fractionation of phosphate in a maturity sequence of New Zeland basaltic soil profiles. *Soil Sci*, 107: 22-30.

Anexo I

Procedimiento de extracción del P basado en el método de fraccionamiento de P propuesto por Tiessen y Moir (1993)

El fraccionamiento se realizó en alícuotas duplicadas por muestra, como se describe a continuación:

1. Se pesaron 0.5 g de suelo en un tubo de centrifuga de 50 mL, se adicionaron a una bolsa de resina de intercambio iónico (RII) (IRA-410 Merck) y 30 mL de agua desionizada y se agitó toda la noche (16hrs).

2. Se removió la bolsa de RII del tubo, lavando con agua desionizada dentro del tubo para eliminar los residuos de suelo que quedaran en la bolsa. Después se colocó en un tubo de 50 mL limpio y se adicionó 20 mL de **HCl** 0.5M. Se puso a un lado por 1hr para permitir que escapara el gas, se cubrió y agitó toda la noche (Agitador Shaker SK-71). Para después *Determinar el P con ICP-Óptico* (Optical Emisión Spectrometer, Optima 4300DV, Perkin Elmer Instruments).

3. Se centrifugó la suspensión de suelo a 5000 rpm por 10 min. a -1 °C de temperatura (32R Hettich-Zentrifugen). Se decantó el agua con un filtro millipore (tamaño de poro 0,45µm) al vacío y se descargó el agua para lavar el suelo filtrado dentro del tubo con un poco de solución de **NaHCO₃** 0.5M (pH 8.5). Se adicionó más NaHCO₃ hasta llevarlo a un volumen de 30mL (por peso) y se agitó la suspensión toda la noche (16 hrs.). Cerciorándose que el suelo estuviera libre en el fondo antes de ponerlo a agitar. Se centrifugó la suspensión del suelo a 5000rpm por 10 min., a -1 °C. Se decantó el extracto de NaHCO₃ por un filtro millipore a un vial limpio. Para después *determinar el P inorgánico y el P total en el extracto de bicarbonato*.

4. Se lavó el suelo filtrado que estaba en el fondo del tubo usando un poco de **NaOH** 0.1M. Y se llevó la solución de NaOH a 30mL y se agitó la suspensión toda la noche (16hrs). Después se centrifugó la suspensión del suelo a 5000 rpm por 10 min., a -1 °C. Se decantó el extracto de NaOH y se filtró al vacío en un vial limpio. Para después *determinar el P inorgánico y el P total en el extracto de NaOH*.

5. Se lavó el suelo filtrado dentro del tubo con un poco de solución de **HCl** 1M. Se llevó a un volumen de 30mL de HCl 1M y se agitó la suspensión toda la noche (16hrs). Se centrifugó la

suspensión de suelo a 5000 rpm por 10 min., a -1 °C. Se decantó el extracto de HCl suavemente para no se perdiera el suelo. Para después *determina el P del extracto*.

6. El residuo del suelo se calentó con 10 mL de **HCl** concentrado en baño maría a 80 °C por 10 minutos. (Agitando bien la mezcla y aflojando las tapas antes de poner en el baño maría) tomando la temperatura durante los 10 minutos para observar que se mantuviera a 80 °C en el HCl de la mezcla. Se removió y se agregó después 5 mL de HCl concentrado, para después revolver y permitir que se enfriara a temperatura ambiente por 1hr (Agitando cada 15 min.). Después se apretaron las tapas y se centrifugó la suspensión del suelo a 5000 rpm por 10 min., a -1 °C, se decantó en un matraz volumétrico de 50mL. Para después *determinar el P inorgánico y el P total en el extracto de HCl concentrado*.

7. Se adicionó 10 mL de agua desionizada al residuo de suelo. Se colocó la suspensión en un tubo de digestión de 75 mL (usando la mínima cantidad posible de agua para transferir todo el residuo de suelo), se adicionó 5 mL de H₂SO₄ concentrado y piedras de ebullición, se removió y agregó a un aparato de digestión frío (Labconco 84-70-130). Se aumentó la temperatura muy lentamente para evaporar el agua y cuando llegó a 360°C, se dejó enfriar nuevamente a temperatura ambiente. Se colocó la suspensión en un matraz Erlenmeyer de 50 mL y comenzó el tratamiento con H₂O₂ al 30% siguiendo los pasos que se tienen a continuación: se agregó 0.5 mL de H₂O₂; se recalentó hasta observar que se desprendan los vapores, y se dejó enfriar. Se repitieron las adiciones de H₂O₂ hasta que el líquido se aclaró (usualmente alrededor de 10 tiempos). Se enfrió y se colocó el producto en un frasco vial limpio. Para después *determinar P en solución*.

Anexo II Concentración de las P (mg/l) en las fracciones obtenidas en dos réplicas para los horizontes Ah y Bw

Tabla A. La tabla presenta las muestras que mantuvieron diferente nivel de color, una vez que se terminó el tratamiento en cada fracción.

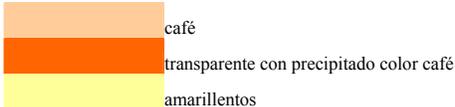
Muestras con humedad de campo

Sitio	Edad	Horiz.	Clave	Resina		NaHCO ₃				NaOH				HCl 1M		HCl conc.				Digestión	
						Ptotal		Pi		Ptotal		Pi				Ptotal		Pi			
						mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.
Popocatepetl	1000	Ah	86-H1	1.10	-0.47	n.d.	N.C.	1.42	0.25	n.d.	N.C.	2.28	-0.18	1.53	-0.05	n.d.	N.C.	0.67	0.35	1.35	-0.24
	1000	Ah	86-H2	1.56		0.42		1.17		1.10		2.46		1.58		0.26		0.33		1.59	
Guespalapa	2185	Ah	218-H1	1.46	-0.34	0.31	0.18	0.74	0.01	4.01	1.28	7.79	2.29	4.98	2.36	0.51	-1.97	3.99	3.40	1.95	0.59
	2185	Ah	218-H2	1.79		0.14		0.74		2.73		5.50		2.62		2.48		0.59		1.36	
Tláloc	6200	Ah1	04-H1	0.88	0.24	0.20	0.00	0.69	-0.02	4.10	-0.23	8.97	-0.12	2.01	-1.02	0.72	0.22	0.49	-0.09	3.88	0.12
	6200	Ah1	04-H2	0.64		0.20		0.71		4.33		9.09		3.02		0.49		0.58		3.76	
El Pelado	10000	Ah1	32-H1	1.05	0.21	0.22	-0.05	0.65	-0.14	4.05	-0.17	7.54	-0.65	2.60	-0.72	1.46	N.C.	0.81	-0.04	3.70	-1.28
	10000	Ah1	32-H2	0.84		0.27		0.79		4.21		8.19		3.31		<LD		0.85		4.98	
Quinto Barrio	100000	Ah	65-H1	0.27	0.01	0.10	-0.05	0.43	-0.02	<LD	N.C.	3.61	0.17	0.31	-0.01	1.06	0.46	3.87	1.21	4.43	1.99
	100000	Ah	65-H2	0.26		0.15		0.46		1.67		3.44		0.32		0.60		2.66		2.44	
Las Trojes	>100000	Ah	76-H1	0.31	0.16	<LD	N.C.	0.23	-0.06	0.72	-0.13	1.08	-0.07	0.14	0.03	1.29	N.C.	0.67	-1.02	1.35	-2.48
	>100000	Ah	76-H2	0.16		<LD		0.29		0.85		1.14		0.11		<LD		1.69		3.83	

Muestras secadas al aire

Sitio	Edad	Horiz.	Clave	Resina		NaHCO ₃				NaOH				HCl 1M		HCl conc.				Digestión	
						Ptotal		Pi		Ptotal		Pi				Ptotal		Pi			
						mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.
Paricutín	0	tefras	42-S1	0.33	0.27	<LD	N.C.	0.08	-0.02	<LD	N.C.	<LD	N.C.	0.30	-0.01	0.77	0.44	0.84	0.63	0.46	0.08
	0	tefras	42-S2	0.06		<LD		0.09		<LD		<LD		0.31		0.33		0.20		0.38	
Paricutín	60	tefras	202-S1	0.41	0.22	<LD	N.C.	0.12	0.00	<LD	N.C.	0.07	-0.05	0.42	0.03	0.24	-0.23	0.22	-0.35	1.30	0.99
	60	tefras	202-S2	0.18		<LD		0.12		<LD		0.12		0.39		0.47		0.57		0.32	
Popocatepetl	1000	Ah	86-S1	2.20	-0.18	0.31	-0.07	0.90	-0.07	0.73	-0.04	1.98	0.05	1.29	-0.11	0.32	0.12	0.42	0.02	1.82	0.08
	1000	Ah	86-S2	2.38		0.38		0.97		0.77		1.93		1.39		0.20		0.39		1.75	
Guespalapa	2185	Ah	218-S1	1.20	-0.86	0.23	-0.04	0.76	0.08	4.30	0.09	8.06	-0.13	3.38	-0.79	1.91	-0.19	2.00	1.33	1.76	0.10
	2185	Ah	218-S2	2.06		0.28		0.68		4.21		8.19		4.17		2.09		0.67		1.66	
Tláloc	6200	Ah1	04-S1	1.02	N.C.	0.11	-0.09	0.47	-0.32	2.27	-2.56	5.20	-5.33	0.71	-1.76	0.47	0.29	0.19	-0.55	4.41	1.05
	6200	Ah1	04-S2	n.d.		0.21		0.80		4.83		10.53		2.47		0.18		0.74		3.36	
El Pelado	10000	Ah1	32-S1	n.d.	N.C.	0.29	-0.03	0.70	-0.05	4.06	-0.04	7.84	-0.04	2.76	-0.27	0.81	0.00	0.79	0.12	4.22	-0.02
	10000	Ah1	32-S2	1.36		0.31		0.75		4.10		7.88		3.03		0.81		0.67		4.24	
Quinto Barrio	100000	Ah	65-S1	0.40	0.17	0.13		0.51	-0.01	1.96	-0.08	3.80	0.01	0.28	-0.07	0.56	-0.16	0.91	-0.63	3.00	0.47
	100000	Ah	65-S2	0.23		0.14	-0.02	0.52		2.04		3.79		0.35		0.72		1.53		2.54	
Las Trojes	>100000	Ah	76-S1	0.15	0.06	0.04	N.C.	0.27	0.03	0.85	0.11	1.23	0.04	0.12	0.04	1.51	0.60	1.54	0.43	1.82	-0.22
	>100000	Ah	76-S2	0.10		<LD		0.23		0.74		1.19		0.08		0.91		1.10		2.03	

Escala de color



Dif. = Diferencia = Replica 1-Replica 2

LD = Límite de detección

LD = 0.040 mg/L

n. d. = no determinado N. C. = no calculado

Ejemplo Clave A-BC

A= No. de muestra

B= Tratamiento: H= Húmedo, S= Seco, Q= Quemado

C= No. de repetición

Muestras con tratamiento térmico a 300° C.

Sitio	Edad	Horiz.	Clave	Resina		NaHCO ₃				NaOH				HCl 1M		HCl conc.				Digestión					
						Ptotal		Pi		Ptotal		Pi		mg/L	Dif.	Ptotal		Pi		mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.
						mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.			mg/L	Dif.	mg/L	Dif.						
Paricutin	0	tefras	42-Q1	0.34	-0.02	<LD	N.C.	0.11	-0.01	<LD	N.C.	<LD	N.C.	0.28	0.05	1.25	0.43	0.21	0.00	0.08	-1.48				
	0	tefras	42-Q2	0.36		<LD		0.12		<LD		<LD		0.24		0.82		0.21		1.56					
Paricutin	60	tefras	202-Q1	0.22	-0.09	<LD	N.C.	0.17	-0.06	<LD	N.C.	<LD	N.C.	0.36	0.02	1.06	0.06	0.22	-1.24	0.35	0.05				
	60	tefras	202-Q2	0.31		<LD		0.22		<LD		<LD		0.35		1.00		1.46		0.30					
Popocatépetl	1000	Ah	86-Q1	2.27	-0.50	<LD	N.C.	0.34	-0.03	0.42	-0.23	1.37	-0.09	4.16	0.23	0.25	-0.82	0.73	0.12	2.00	N.C.				
	1000	Ah	86-Q2	2.77		<LD		0.36		0.65		1.45		3.93		1.07		0.61		n.d.					
Guespalapa	2185	Ah	218-Q1	8.60	6.99	0.24	-0.04	0.79	-0.05	4.11	0.76	8.96	2.37	3.76	0.48	1.95	0.76	0.20	-0.90	0.65	-0.55				
	2185	Ah	218-Q2	1.62		0.28		0.84		3.35		6.60		3.28		1.19		1.10		1.20					
Tláloc	6200	Ah1	04-Q1	4.34	-0.67	0.12	-0.02	0.64	-0.02	5.31	0.05	13.25	0.29	6.10	-0.02	0.65	-0.65	0.92	-0.11	3.88	-1.12				
	6200	Ah1	04-Q2	5.00		0.15		0.66		5.26		12.96		6.13		1.30		1.04		5.00					
El Pelado	10000	Ah1	32-Q1	6.35	2.20	0.22	-0.01	0.82	0.01	5.12	0.75	12.01	2.06	7.71	-2.22	0.77	N.C.	1.64	-0.06	1.77	0.10				
	10000	Ah1	32-Q2	4.16		0.24		0.81		4.38		9.95		9.93		<LD		1.70		1.67					
Quinto Barrio	100000	Ah	65-Q1	1.03	-0.12	0.08	0.01	0.41	0.02	2.91	0.16	7.49	0.12	2.34	-0.22	0.65	-0.37	3.30	1.51	2.34	0.94				
	100000	Ah	65-Q2	1.14		0.07		0.39		2.75		7.38		2.56		1.02		1.79		1.40					
Las Trojes	>100000	Ah	76-Q1	0.32	0.30	0.06	-0.02	0.50	0.00	1.39	-0.49	2.73	-0.92	0.89	-0.15	1.36	-0.38	1.25	-0.06	0.76	0.02				
	>100000	Ah	76-Q2	0.02		0.08		0.50		1.88		3.65		1.04		1.74		1.31		0.74					

Dif. = Diferencia = Replica 1-Replica 2

LD = Límite de detección

LD = 0.040 mg/L

n. d. =no determinado N. C. = no calculado

Ejemplo Clave A-BC

A= No. de muestra

B= Tratamiento: H= Húmedo, S= Seco, Q= Quemado

C= No. de repetición

Tablas B. La tabla presenta las muestras que mantuvieron diferente nivel de color, una vez que se terminó el tratamiento en cada fracción.

Muestras que conservaron su humedad de campo

Sitio	Edad	Horiz.	Clave	Resina		NaHCO ₃				NaOH				HCl 1M		HCl conc.				Digestión					
						Ptotal		Pi		Ptotal		Pi		mg/L	Dif.	Ptotal		Pi		mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.
						mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.			mg/L	Dif.	mg/L	Dif.						
Guespalapa	2185	Bw	220-H1	1.46	-0.27	<LD	N.C.	0.39	0.10	3.50	0.62	7.03	0.92	5.64	-0.58	1.46	0.08	1.42	0.97	0.78	-0.04				
	2185	Bw	220-H2	1.72		<LD		0.29		2.89		6.11		6.21		1.38		0.45		0.81					
Tláloc	6200	2Bw	06-H1	0.20	-0.05	0.14	N.C.	0.25	0.01	2.91	-0.51	7.30	-0.18	2.46	0.11	1.27	0.46	0.77	0.10	5.70	0.93				
	6200	2Bw	06-H2	0.26		<LD		0.24		3.41		7.48		2.35		0.82		0.67		4.77					
El Pelado	10000	Bw	35-H1	0.17	0.05	0.20	N.C.	0.23	0.03	2.42	0.23	4.98	0.17	2.82	-0.16	2.06	1.24	6.35	5.19	2.16	-0.01				
	10000	Bw	35-H2	0.12		<LD		0.19		2.19		4.81		2.97		0.82		1.16		2.17					
Quinto Barrio	100000	3Bw1	68-H1	<LD	N.C.	<LD	N.C.	0.17	0.03	0.56	-0.06	1.38	0.02	0.16	-0.13	1.10	0.40	1.32	0.47	0.77	0.23				
	100000	3Bw1	68-H2	0.04		<LD		0.14		0.62		1.35		0.29		0.70		0.85		0.54					
Las Trojes	>100000	Bt(g)	78-H1	<LD	N.C.	<LD	N.C.	0.13	-0.02	0.11	0.00	0.30	-0.07	<LD	N.C.	1.35	0.36	0.81	-1.37	0.63	-0.25				
	>100000	Bt(g)	78-H2	<LD		<LD		0.14		0.12		0.37		<LD		0.99		2.18		0.88					

Escala de color

café

transparente con precipitado color café

amarillentos

Dif. = Diferencia = Replica 1-Replica 2

LD = Límite de detección

LD = 0.040 mg/L

n. d. =no determinado N. C. = no calculado

Ejemplo Clave A-BC

A= No. de muestra

B= Tratamiento: H= Húmedo, S= Seco, Q= Quemado

C= No. de repetición

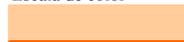
Muestras secadas al aire

Sitio	Edad	Horiz.	Clave	Resina		NaHCO ₃				NaOH				HCl 1M		HCl conc.				Digestión	
						Ptotal		Pi		Ptotal		Pi				Ptotal		Pi			
						mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.
Guespalapa	2185	Bw	220-S1	1.71	0.32	<LD	N.C.	0.34	-0.01	3.06	-0.05	6.25	-0.03	4.34	-1.53	1.33		0.86	-0.03	0.70	0.14
	2185	Bw	220-S2	1.38		<LD	N.C.	0.34		3.11		6.28		5.87		<LD		0.89		0.56	
Tláloc	6200	2Bw	06-S1	0.36	0.04	n.d.	N.C.	n.d.	N.C.	n.d.	N.C.	n.d.	N.C.	n.d.	N.C.	0.73		n.d.	N.C.	n.d.	N.C.
	6200	2Bw	06-S2	0.32		<LD	N.C.	0.32		4.36		9.43		3.58		n.d.		0.85		6.05	
El Pelado	10000	Bw	35-S1	0.35	0.14	<LD	N.C.	0.24	0.04	2.33	-0.12	5.00	0.14	3.12	0.14	0.08	-0.89	0.94	-0.66	2.51	1.03
	10000	Bw	35-S2	0.22		<LD	N.C.	0.21		2.45		4.86		2.98		0.97		1.60		1.48	
Quinto Barrio	100000	3Bw1	68-S1	<LD	N.C.	<LD	N.C.	0.23	0.00	0.74	0.13	1.46	-0.03	0.10	0.00	0.74	-0.12	3.16	1.93	1.01	0.32
	100000	3Bw1	68-S2	<LD		<LD	N.C.	0.23		0.61		1.49		0.10		0.86		1.24		0.70	
Las Trojes	>100000	Bt(g)	78-S1	<LD	N.C.	<LD	N.C.	0.15	0.01	0.09	0.01	0.31	0.02	<LD	N.C.	1.30	0.16	0.93	-0.16	0.72	0.01
	>100000	Bt(g)	78-S2	0.05		<LD	N.C.	0.14		0.09		0.29		<LD	N.C.	1.14		1.09		0.71	

Muestras tratadas térmicamente (quemadas a 300° C)

Sitio	Edad	Horiz.	Clave	Resina		NaHCO ₃				NaOH				HCl 1M		HCl conc.				Digestión	
						Ptotal		Pi		Ptotal		Pi				Ptotal		Pi			
						mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.	mg/L	Dif.
Guespalapa	2185	Bw	220-Q1	3.06	-0.78	0.20	-0.08	0.73	0.05	3.24	-0.13	6.74	-0.30	5.36	0.93	1.59	0.55	2.63	2.22	0.55	-0.52
	2185	Bw	220-Q2	3.84		0.28		0.69		3.37		7.04		4.43		1.05		0.41		1.07	
Tláloc	6200	2Bw	06-Q1	2.21	-0.01	0.10	-0.02	0.62	0.05	3.89	-0.94	9.28	-2.28	7.31	1.33	1.00	-0.76	1.36	0.23	3.51	1.19
	6200	2Bw	06-Q2	2.22		0.11		0.56		4.83		11.56		5.99		1.76		1.13		2.33	
El Pelado	10000	Bw	35-Q1	1.96	-0.35	0.11	0.02	0.52	0.02	2.26	-0.12	5.16	-0.31	4.34	0.48	0.74	-0.63	1.14	-0.02	1.10	0.93
	10000	Bw	35-Q2	2.31		0.09		0.50		2.38		5.47		3.85		1.37		1.16		0.17	
Quinto Barrio	100000	3Bw1	68-Q1	<LD	N.C.	<LD	N.C.	0.39	0.02	1.01	0.25	2.41	0.39	0.11	-0.11	0.82	0.00	2.69	1.58	1.39	-0.38
	100000	3Bw1	68-Q2	0.05		<LD	N.C.	0.37		0.76		2.01		0.22		0.82		1.11		1.76	
Las Trojes	>100000	Bt(g)	78-Q1	0.03	N.C.	<LD	N.C.	0.29	-0.01	0.64	0.09	1.41	N.C.	0.14	0.02	1.51	-1.35	0.93	-0.16	0.68	0.19
	>100000	Bt(g)	78-Q2	<LD		<LD	N.C.	0.31		0.55		<LD		0.11		2.86		1.09		0.49	

Escala de color

	café
	transparente con precipitado color café
	amarillentos

Dif. = Diferencia = Replica 1-Replica 2

LD = Límite de detección

LD = 0.040 mg/L

n. d. = no determinado N. C. = no calculado

Ejemplo Clave A-BC

A= No. de muestra

B= Tratamiento: H= Húmedo, S= Seco, Q= Quemado

C= No. de repetición

Anexo III. Concentración de P en mg/Kg para cada extracción del Horizonte Ah (promedios de análisis duplicados por muestra)
Suelos Húmedos

Sitio	Edad	RII (mg/Kg)	NaHCO ₃ (mg/Kg)			NaOH (mg/Kg)			HCl 1M (mg/Kg)	HCl conc. (mg/Kg)			Digestión (mg/Kg)
			Pi	Po	PT	Pi	Po	PT		Pi	Po	PT	
Popocatepetl	1,000	53.23	4.19	21.74	25.93	10.95	36.48	47.43	93.02	2.64	7.34	9.98	14.69
Guespalapa	2,185	65.01	3.81	11.01	14.82	53.69	79.13	132.82	227.83	14.98	30.84	45.81	16.51
Tlálloc	6,200	30.40	3.01	11.01	14.02	62.70	117.93	180.63	150.89	6.05	4.63	10.68	38.21
El Pelado	10,000	37.78	3.54	10.91	14.45	61.53	95.78	157.31	177.34	14.56	2.08	16.64	43.42
Q. Barrio	100,000	10.45	1.74	7.18	8.92	0.00	70.43	70.43	19.11	8.29	57.05	65.33	34.33
Las Trojes	>100,000	10.45	0	5.21	5.21	11.47	10.73	22.20	7.36	12.89	10.71	23.59	25.87

Suelos Secos

Sitio	Edad	RII (mg/Kg)	NaHCO ₃ (mg/Kg)			NaOH (mg/Kg)			HCl 1M (mg/Kg)	HCl concentrado (mg/Kg)			Digestión (mg/Kg)
			Pi	Po	PT	Pi	Po	PT		Pi	Po	PT	
Paricutín	0	7.77	0.00	1.70	1.70	0.00	0.00	0.00	18.25	5.47	4.93	10.40	4.18
Paricutín	60	11.80	0.00	2.44	2.44	0.00	1.88	1.88	24.25	3.51	4.37	7.88	8.08
Popocatepetl	1,000	91.42	4.93	13.72	18.66	11.16	27.99	39.15	80.31	2.61	5.47	8.08	17.83
Guespalapa	2,185	65.12	3.70	10.64	14.35	64.02	98.54	162.57	226.27	20.00	6.75	26.75	17.06
Tlálloc	6,200	40.71	2.16	10.53	12.69	46.85	110.45	157.30	95.32	3.22	6.01	9.23	38.81
El Pelado	10,000.00	54.26	4.40	10.02	14.42	61.13	96.00	157.14	173.50	8.09	6.56	14.64	42.27
Q. Barrio	100,000	12.67	1.99	8.23	10.22	29.81	46.03	75.84	18.86	6.37	18.02	24.40	27.69
Las Trojes	>100,000	4.97	0	5.01	5.01	12.19	12.05	24.24	5.82	15.09	11.32	26.41	19.26

Suelos Quemados

Sitio	Edad	RII (mg/Kg)	NaHCO ₃ (mg/Kg)			NaOH (mg/Kg)			HCl 1M (mg/Kg)	HCl concentrado (mg/Kg)			Digestión (mg/Kg)
			Pi	Po	PT	Pi	Po	PT		Pi	Po	PT	
Paricutín	0	13.89	0.00	2.33	2.33	0.00	0.00	0.00	15.63	10.32	-6.20	4.12	8.17
Paricutín	60	10.65	0.00	3.91	3.91	0.00	0.00	0.00	21.37	10.31	6.52	16.84	3.24
Popocatepetl	1,000	100.74	0.00	7.00	7.00	7.38	20.81	28.20	242.79	6.58	6.80	13.38	10.02
Guespalapa	2,185	204.31	3.81	12.53	16.34	57.81	97.75	155.57	211.15	15.68	-2.62	13.05	9.24
Tlálloc	6,200	186.82	1.94	11.00	12.94	79.39	182.67	262.06	366.87	9.74	9.84	19.57	44.43
El Pelado	10,000	210.24	3.39	12.82	16.21	73.12	146.38	219.50	529.17	7.58	25.90	33.48	17.19
Q. Barrio	100,000	43.38	1.15	6.90	8.05	42.84	105.86	148.70	146.97	8.38	42.50	50.89	18.69
Las Trojes	>100,000	6.87	0.99	8.94	9.92	23.26	40.60	63.86	57.72	13.64	11.87	25.51	7.50

Anexo IV. Concentración de P en mg/Kg para cada extracción del Horizonte Bw (promedios de análisis duplicados por muestra)

Suelos Húmedos

Sitio	Edad	RII (mg/Kg)	NaHCO ₃ (mg/Kg)			NaOH (mg/Kg)			HCl 1M (mg/Kg)	HCl concentrado (mg/Kg)			Digestión (mg/Kg)
			Pi	Po	PT	Pi	Po	PT		Pi	Po	PT	
Guestapalapa	2,185	63.57	0.00	6.78	6.78	49.46	81.88	131.34	355.33	14.22	4.51	18.73	7.93
Tlálloc	6,200	9.16	1.43	3.53	4.96	46.15	101.68	147.83	144.16	10.44	3.79	14.23	52.35
El Pelado	10,000	5.80	2.04	2.17	4.21	35.13	62.72	97.85	173.65	14.39	60.65	75.04	21.64
Q. Barrio	100,000	1.69	0.00	3.11	3.11	8.65	18.65	27.30	13.48	8.96	12.78	21.74	6.57
Las Trojes	>100,000	0.00	0	2.74	2.74	1.72	4.93	6.64	0.00	13.52	16.36	29.88	7.52

Suelos Secos

Sitio	Edad	RII (mg/Kg)	NaHCO ₃ (mg/Kg)			NaOH (mg/Kg)			HCl 1M (mg/Kg)	HCl concentrado (mg/Kg)			Digestión (mg/Kg)
			Pi	Po	PT	Pi	Po	PT		Pi	Po	PT	
Guestapalapa	2,185	61.77	0.00	6.80	6.80	46.19	79.09	125.28	306.10	13.25	4.18	17.43	6.34
Tlálloc	6,200	13.66	0.00	6.29	6.29	43.60	144.90	188.50	214.78	3.66	13.42	17.08	60.52
El Pelado	10,000	11.31	0.00	4.47	4.47	35.54	63.09	98.63	182.91	5.28	20.11	25.39	19.97
Q. Barrio	100,000	0.00	0.00	4.56	4.56	10.46	19.04	29.50	6.17	7.99	35.99	43.98	8.53
Las Trojes	>100,000	2.04	0	2.83	2.83	1.38	4.61	5.99	0.00	12.96	7.18	20.15	7.12

Suelos Quemados

Sitio	Edad	RII (mg/Kg)	NaHCO ₃ (mg/Kg)			NaOH (mg/Kg)			HCl 1M (mg/Kg)	HCl concentrado (mg/Kg)			Digestión (mg/Kg)
			Pi	Po	PT	Pi	Po	PT		Pi	Po	PT	
Guestapalapa	2,185	138.04	3.42	10.79	14.21	49.27	88.46	137.73	293.57	13.20	17.19	30.38	8.09
Tlálloc	6,200	88.43	1.52	10.26	11.78	63.06	145.34	208.40	398.92	13.76	11.19	24.95	29.18
El Pelado	10,000	85.21	1.53	8.69	10.22	3.52	102.73	106.25	245.72	10.54	12.49	23.03	6.37
Q. Barrio	100,000	1.97	0.00	7.58	7.58	13.93	30.25	44.18	9.97	8.19	29.86	38.04	15.73
Las Trojes	>100,000	1.22	0	5.99	5.99	9.08	19.16	28.24	7.46	15.12	5.05	20.17	5.87

Anexo V. Porcentaje de las concentraciones de P para cada extracto del Horizonte Ah

Suelos Húmedos

Sitio	Edad	RII %	NaHCO ₃ %	NaOH %	HCl 1M %	HCl conc. %	Digestión %
Popocatépetl	1,000	21.79	10.62	19.42	38.08	4.08	6.01
Guespalapa	2,185	12.93	2.95	26.42	45.31	9.11	3.28
Tláloc	6,200	7.16	3.30	42.52	35.52	2.51	8.99
El Pelado	10,000	8.45	3.23	35.20	39.68	3.72	9.71
Q. Barrio	100,000	5.01	4.28	33.77	9.16	31.32	16.46
Las Trojes	>100,000	11.04	5.50	23.45	7.78	24.92	27.32

Suelos Secos

Sitio	Edad	RII %	NaHCO ₃ %	NaOH %	HCl 1M %	HCl conc. %	Digestión %
Paricutín	0	18.37	4.02	0	43.14	24.59	9.88
Paricutín	60	20.95	4.33	3.34	43.05	13.98	14.35
Popocatépetl	1,000	35.79	7.30	15.33	31.44	3.16	6.98
Guespalapa	2,185	12.72	2.80	31.74	44.18	5.22	3.33
Tláloc	6,200	11.50	3.58	44.43	26.92	2.61	10.96
El Pelado	10,000	11.89	3.16	34.44	38.03	3.21	9.27
Q. Barrio	100,000	7.47	6.02	44.70	11.11	14.38	16.32
Las Trojes	>100,000	5.80	5.84	28.28	6.79	30.81	22.47

Suelos Quemados

Sitio	Edad	RII %	NaHCO ₃ %	NaOH %	HCl 1M %	HCl conc. %	Digestión %
Paricutín	0	31.47	5.29	0	35.40	9.33	18.52
Paricutín	60	19.02	6.98	0.00	38.16	30.06	5.78
Popocatépetl	1,000	25.05	1.74	7.01	60.38	3.33	2.49
Guespalapa	2,185	33.51	2.68	25.52	34.63	2.14	1.51
Tláloc	6,200	20.93	1.45	29.36	41.10	2.19	4.98
El Pelado	10,000	20.50	1.58	21.40	51.59	3.26	1.68
Q. Barrio	100,000	10.41	1.93	35.69	35.27	12.21	4.48
Las Trojes	>100,000	4.01	5.79	37.26	33.68	14.89	4.38

Anexo VI. Porcentaje de las concentraciones de P para cada extracto del Horizonte Bw

Suelos Húmedos

Sitio	Edad	RII	NaHCO₃	NaOH	HCl 1M	HCl conc.	Digestión
		%	%	%	%	%	%
Guespalapa	2185	10.89	1.16	22.50	60.88	3.21	1.36
Tlálóc	6200	2.46	1.33	39.67	38.68	3.82	14.05
El Pelado	10000	1.53	1.11	25.87	45.92	19.84	5.72
Q. Barrio	100000	2.29	4.21	36.95	18.24	29.42	8.89
Las Trojes	>100000	0.00	5.85	14.20	0.00	63.87	16.08

Suelos Secos

Sitio	Edad	RII	NaHCO₃	NaOH	HCl 1M	HCl conc.	Digestión
		%	%	%	%	%	%
Guespalapa	2185	11.79	1.30	23.92	58.45	3.33	1.21
Tlálóc	6200	2.73	1.26	37.64	42.89	3.41	12.08
El Pelado	10000	3.30	1.31	28.78	53.38	7.41	5.83
Q. Barrio	100000	0.00	4.91	31.81	6.65	47.43	9.20
Las Trojes	>100000	5.35	7.43	15.71	0.00	52.84	18.68

Suelos Quemados

Sitio	Edad	RII	NaHCO₃	NaOH	HCl 1M	HCl conc.	Digestión
		%	%	%	%	%	%
Guespalapa	2185	22.19	2.28	22.14	47.20	4.88	1.30
Tlálóc	6200	11.61	1.55	27.36	52.38	3.28	3.83
El Pelado	10000	17.87	2.14	22.28	51.54	4.83	1.34
Q. Barrio	100000	1.68	6.45	37.61	8.48	32.38	13.39
Las Trojes	>100000	1.77	8.68	40.95	10.81	29.26	8.52

Anexo VII. Cantidad de P en g / m² para cada una de las fracciones del Horizonte Ah

Suelos Húmedos

Sitio	Edad	D. A. (Kg/dm ³)	Po (g/m ²)	P Occ (g/m ²)	P No-Occ (g/m ²)	P Ca (g/m ²)	Σ Fracciones (g/m ²)	P Total (g/m ²) en 10 cm
Popocatépetl	1000	0.85	5.59	1.48	5.83	7.93	20.82	87.43
Guespalapa	2185	0.64	7.78	2.02	7.88	14.65	32.33	169.70
Tlálloc	6200	0.44	5.87	1.95	4.23	6.64	18.68	109.62
El Pelado	10000	0.45	4.87	2.60	4.60	7.94	20.01	121.61
Q. Barrio	100000	0.52	6.96	2.20	0.63	0.99	10.78	68.39
Las Trojes	>100000	0.84	2.24	3.25	1.84	0.62	7.95	57.25

Suelos Secos

Sitio	Edad	D. A. (Kg/dm ³)	Po (g/m ²)	P Occ (g/m ²)	P No-Occ (g/m ²)	P Ca (g/m ²)	Σ Fracciones (g/m ²)	P Total (g/m ²) en 10 cm
Paricutín	0	1.25	0.83	1.21	0.97	2.28	5.29	157.97
Paricutín	60	1.3	1.13	1.51	1.53	3.15	7.32	172.30
Popocatépetl	1000	0.85	4.02	1.74	9.17	6.85	21.78	87.43
Guespalapa	2185	0.64	7.45	2.38	8.54	14.55	32.93	169.70
Tlálloc	6200	0.44	5.58	1.85	3.95	4.19	15.57	109.62
El Pelado	10000	0.45	5.04	2.25	5.36	7.77	20.42	121.61
Q. Barrio	100000	0.52	3.73	1.76	2.30	0.97	8.77	68.39
Las Trojes	>100000	0.84	2.38	2.88	1.44	0.49	7.19	57.25

Suelos Quemados

Sitio	Edad	D. A. (Kg/dm ³)	Po (g/m ²)	P Occ (g/m ²)	P No-Occ (g/m ²)	P Ca (g/m ²)	Σ Fracciones (g/m ²)	P Total (g/m ²) en 10 cm
Paricutín	0	1.25	-0.48	2.31	1.74	1.95	5.52	157.97
Paricutín	60	1.3	1.36	1.76	1.38	2.78	7.28	172.30
Popocatépetl	1000	0.85	2.95	1.42	9.22	20.70	34.28	87.43
Guespalapa	2185	0.64	6.92	1.60	17.10	13.58	39.20	169.70
Tlálloc	6200	0.44	8.95	2.38	11.79	16.13	39.26	109.62
El Pelado	10000	0.45	8.29	1.11	12.84	23.69	45.92	121.61
Q. Barrio	100000	0.52	8.02	1.40	4.51	7.59	21.53	68.39
Las Trojes	>100000	0.84	5.15	1.77	2.61	4.84	14.38	57.25

Anexo VIII. Cantidad de P en g / m² para cada una de las fracciones del Horizonte Bw

Suelos Húmedos

Sitio	Edad	D. A. (Kg/dm ³)	Po (g/m ²)	P Occ (g/m ²)	P No-Occ (g/m ²)	P Ca (g/m ²)	Σ Fracciones (g/m ²)	P Total (g/m ²) en 10 cm
Guespalapa	2185	0.81	7.50	1.78	9.10	28.62	47.01	195.28
Tlálloc	6200	0.47	5.08	2.93	2.65	6.72	17.38	99.25
El Pelado	10000	0.73	9.20	2.64	3.15	12.73	27.72	98.93
Q. Barrio	100000	0.78	2.71	1.22	0.81	1.06	5.80	38.48
Las Trojes	>100000	1.07	2.57	2.26	0.18	0.00	5.01	44.44

Suelos Secos

Sitio	Edad	D. A. (Kg/dm ³)	Po (g/m ²)	P Occ (g/m ²)	P No-Occ (g/m ²)	P Ca (g/m ²)	Σ Fracciones (g/m ²)	P Total (g/m ²) en 10 cm
Guespalapa	2185	0.81	7.25	1.58	8.69	24.65	42.18	195.28
Tlálloc	6200	0.47	7.68	2.99	2.67	10.02	23.36	99.25
El Pelado	10000	0.73	6.43	1.85	3.43	13.41	25.12	98.93
Q. Barrio	100000	0.78	4.68	1.30	0.82	0.48	7.28	38.48
Las Trojes	>100000	1.07	1.57	2.15	0.37	0.00	4.09	44.44

Suelos Quemados

Sitio	Edad	D. A. (Kg/m ³)	Po (g/m ²)	P Occ (g/m ²)	P No-Occ (g/m ²)	P Ca (g/m ²)	Σ Fracciones (g/m ²)	P Total (g/m ²) en 10 cm
Guespalapa	2185	0.81	9.38	1.71	15.36	23.64	50.10	195.28
Tlálloc	6200	0.47	7.78	2.00	7.14	18.61	35.53	99.25
El Pelado	10000	0.73	9.08	1.24	6.62	18.01	34.95	98.93
Q. Barrio	100000	0.78	5.31	1.88	1.25	0.78	9.22	38.48
Las Trojes	>100000	1.07	3.24	2.25	1.10	0.80	7.39	44.44

Anexo IX. Datos de P Total obtenidos por FRX

Tabla de las muestras con Horizonte Ah

Sitio	Hzte.	Edad	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ t %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	suma %	P %	P Total (g/m ²) en 10 cm
Paricutín	Tefras	0	56.03	0.95	17.35	7.78	0.12	5.72	6.84	3.74	1.19	0.29	100.00	0.126	157.97
Paricutín	Ac	60	55.15	0.96	17.04	8.26	0.12	6.47	6.87	3.73	1.10	0.30	100.00	0.133	172.30
Popocatepetl	Ah	1000	64.71	0.74	16.09	4.91	0.09	2.77	4.71	3.94	1.80	0.24	100.00	0.103	87.43
Guespalapa	Ah	2185	52.68	1.52	17.50	9.31	0.16	7.57	6.64	3.02	0.98	0.61	100.00	0.264	169.70
Tlálloc	Ah	6200	64.25	1.02	16.50	6.57	0.14	3.36	4.07	2.43	1.08	0.57	99.99	0.249	109.62
El Pelado	Ah	10000	63.97	1.14	16.02	7.03	0.13	3.18	4.94	2.06	0.91	0.62	100.00	0.272	121.61
Qto. Barrio	Ah	100000	62.40	1.23	22.94	6.85	0.21	1.25	2.61	1.35	0.86	0.30	100.00	0.132	68.39
Las Trojes	Ah	>100000	57.64	2.95	24.02	10.48	0.39	0.82	1.83	0.86	0.86	0.16	100.00	0.068	57.25

Tabla de las muestras con Horizonte Bw

Sitio	Hzte.	Edad años	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ t %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	Suma %	P %	P Total (g/m ²) en 10 cm
Guespalapa	Bw	2,185	51.00	1.58	17.58	10.00	0.16	8.69	6.50	3.00	0.92	0.56	100.00	0.242	195.28
Tlálloc	Bw	6,200	59.10	1.24	19.08	8.58	0.11	4.50	3.95	2.17	0.77	0.49	100.00	0.213	99.25
El Pelado	Bw	10,000	54.40	1.22	20.66	9.00	0.11	5.12	5.75	2.76	0.67	0.31	100.00	0.135	98.93
Qto. Barrio	Bw	100,000	55.49	1.42	28.94	8.43	0.08	1.45	1.86	1.50	0.71	0.11	99.99	0.049	38.48
Las Trojes	Bt	>100,000	53.32	1.77	32.97	10.31	0.06	0.37	0.49	0.16	0.46	0.10	100.00	0.041	44.44

Anexo X. Porcentaje de las concentraciones de P en relación al P Total del Horizonte Ah

Suelos Húmedos

Sitio	Edad años	Σ de fracciones %	Po %	P Occ %	P No-Occ %	P Ca %	P resto %
Paricutín	0	0	0	0	0	0	100
Paricutín	60	0	0	0	0	0	100
Popocatepetl	1,000	23.82	6.39	1.69	6.67	9.07	76.18
Guespalapa	2,185	19.05	4.58	1.19	4.64	8.63	80.95
Tlálloc	6,200	17.04	5.36	1.78	3.86	6.05	82.96
El Pelado	10,000	16.45	4.00	2.13	3.79	6.53	83.55
Quinto Barrio	100,000	15.76	10.17	3.22	0.92	1.44	84.24
Las Trojes	>100,000	13.88	3.90	5.68	3.21	1.08	86.12

Suelos Secos

Sitio	Edad años	Σ de fracciones %	Po %	P Occ %	P No-Occ %	P Ca %	P resto %
Paricutín	0	3.35	0.52	0.76	0.61	1.44	96.65
Paricutín	60	4.25	0.66	0.87	0.89	1.83	95.75
Popocatepetl	1,000	24.91	4.60	1.99	10.48	7.83	75.09
Guespalapa	2,185	19.40	4.39	1.40	5.03	8.57	80.60
Tlálloc	6,200	14.21	5.09	1.69	3.60	3.82	85.79
El Pelado	10,000	16.79	4.14	1.85	4.41	6.39	83.21
Quinto Barrio	100,000	12.82	5.46	2.57	3.36	1.42	87.18
Las Trojes	>100,000	12.56	4.16	5.04	2.52	0.85	87.44

Suelos Quemados

Sitio	Edad años	Σ de fracciones %	Po %	P Occ %	P No-Occ %	P Ca %	P resto %
Paricutín	0	3.49	-0.31	1.46	1.10	1.24	96.51
Paricutín	60	4.23	0.79	1.02	0.80	1.61	95.77
Popocatepetl	1,000	39.21	3.38	1.62	10.54	23.67	60.79
Guespalapa	2,185	23.10	4.08	0.94	10.08	8.00	76.90
Tlálloc	6,200	35.82	8.16	2.17	10.76	14.72	64.18
El Pelado	10,000	37.76	6.81	0.91	10.56	19.48	62.24
Quinto Barrio	100,000	31.48	11.73	2.05	6.60	11.10	68.52
Las Trojes	>100,000	25.12	9.00	3.10	4.56	8.46	74.88

Anexo XI. Porcentaje de las concentraciones de P en relación al P Total del Horizonte Bw

Suelos Húmedos

Sitio	Edad años	Σ de fracciones %	Po %	P Occ %	P No-Occ %	P Ca %	P resto %
Guespalapa	2,185	24.07	3.84	0.91	4.66	14.65	75.93
Tláloc	6,200	17.51	5.12	2.95	2.67	6.77	82.49
El Pelado	10,000	28.02	9.30	2.67	3.18	12.87	71.98
Quinto Barrio	100,000	15.07	7.04	3.17	2.11	2.75	84.93
Las Trojes	>100,000	11.28	5.79	5.07	0.41	0.00	88.72

Suelos Secos

Sitio	Edad años	Σ de fracciones %	Po %	P Occ %	P No-Occ %	P Ca %	P resto %
Guespalapa	2,185	21.60	3.71	0.81	4.45	12.62	78.40
Tláloc	6,200	23.54	7.74	3.02	2.69	10.09	76.46
El Pelado	10,000	25.39	6.50	1.87	3.47	13.55	74.61
Quinto Barrio	100,000	18.91	12.15	3.37	2.13	1.26	81.09
Las Trojes	>100,000	9.19	3.53	4.84	0.82	0.00	90.81

Suelos Quemados

Sitio	Edad años	Σ de fracciones %	Po %	P Occ %	P No-Occ %	P Ca %	P resto %
Guespalapa	2,185	25.65	4.80	0.88	7.87	12.11	74.35
Tláloc	6,200	35.79	7.84	2.02	7.19	18.75	64.21
El Pelado	10,000	35.33	9.18	1.25	6.69	18.21	64.67
Quinto Barrio	100,000	23.96	13.80	4.88	3.24	2.03	76.04
Las Trojes	>100,000	16.62	7.28	5.06	2.48	1.80	83.38

Afecto XII .Tabla de correlaciones (r) de las propiedades de los suelos con las diferentes extracciones del horizonte Ah
Suelos Húmedos

	pH agua	pH KCl	P Bray	P fij.	C	N	CIC	Arcilla	Al d	Si d	Fe d	Al o	Si o	Fe o	Fe p	Al p	Alo-Ald	Sio-Sid	Alo-Alp	Ald-Alp	Feo-Fep
P RII	0.79	0.20	0.46	0.41	0.57	0.37	0.45	0.68	0.60	0.67	0.42	0.33	0.30	0.48	0.14	0.51	0.00	0.10	0.20	0.50	0.54
Po NaHCO₃	0.26	0.52	0.9165	0.7746	0.50	0.20	0.76	0.71	0.73	0.62	0.877	0.64	0.32	0.22	0.28	0.30	0.44	0.00	0.69	0.91	0.17
Pi NaHCO₃	0.67	0.10	0.59	0.66	0.59	0.72	0.40	0.89	0.9381	0.98	0.32	0.775	0.20	0.14	0.69	0.91	0.42	0.10	0.58	0.74	0.24
Po NaOH	0.58	0.44	0.40	0.62	0.26	0.33	0.00	0.66	0.42	0.48	0.10	0.69	0.77	0.72	0.68	0.40	0.87	0.81	0.70	0.32	0.64
Pi NaOH	0.9055	0.75	0.36	0.41	0.00	0.14	0.10	0.48	0.00	0.00	0.17	0.33	0.71	0.85	0.28	0.20	0.69	0.85	0.51	0.14	0.86
Po HCl	0.42	0.14	0.28	0.33	0.20	0.50	0.17	0.14	0.66	0.76	0.00	0.50	0.22	0.00	0.41	0.58	0.22	0.54	0.39	0.53	0.10
Pi HCl	0.33	0.79	0.68	0.54	0.33	0.00	0.80623	0.35	0.24	0.14	0.73	0.37	0.40	0.62	0.26	0.10	0.46	0.00	0.52	0.52	0.61
Pi Digestión	0.00	0.22	0.62	0.77	0.84	0.61	0.58	0.00	0.65	0.62	0.22	0.69	0.24	0.22	0.71	0.65	0.62	0.59	0.60	0.45	0.10

Suelos Secos

	pH agua	pH KCl	P Bray	P fij.	C	N	CIC	Arcilla	Al d	Si d	Fe d	Al o	Si o	Fe o	Fe p	Al p	Alo-Ald	Sio-Sid	Alo-Alp	Ald-Alp	Feo-Fep
P RII	0.39	0.36	0.69	0.00	0.00	0.10	0.00	0.55	0.26	0.24	0.26	0.10	0.24	0.42	0.17	0.39	0.10	0.10	0.17	0.54	0.33
Po NaHCO₃	0.74	0.69	0.52	0.40	0.30	0.44	0.22	0.35	0.17	0.24	0.00	0.49	0.44	0.56	0.00	0.10	0.37	0.20	0.17	0.20	0.37
Pi NaHCO₃	0.78	0.75	0.50	0.39	0.42	0.41	0.51	0.00	0.10	0.00	0.30	0.37	0.26	0.53	0.44	0.61	0.22	0.22	0.00	0.26	0.33
Po NaOH	0.49	0.59	0.32	0.71	0.44	0.41	0.45	0.30	0.49	0.32	0.36	0.78	0.88	0.94	0.53	0.10	0.91	0.81	0.77	0.41	0.88
Pi NaOH	0.51	0.62	0.40	0.75	0.52	0.48	0.61	0.17	0.54	0.36	0.46	0.81	0.87	0.98	0.61	0.10	0.92	0.58	0.81	0.49	0.93
Po HCl	0.59	0.33	0.35	0.51	0.59	0.65	0.54	0.57	0.77	0.73	0.41	0.60	0.10	0.00	0.35	0.68	0.24	0.55	0.41	0.63	0.22
Pi HCl	0.28	0.68	0.42	0.17	0.20	0.35	0.41	0.46	0.00	0.00	0.70	0.10	0.35	0.47	0.17	0.44	0.14	0.28	0.28	0.41	0.53
Pi Digestión	0.50	0.60	0.32	0.77	0.80	0.69	0.63	0.00	0.65	0.65	0.37	0.73	0.41	0.54	0.80	0.71	0.75	0.41	0.66	0.37	0.41

Suelos Quemados

	pH agua	pH KCl	P Bray	P fij.	C	N	CIC	Arcilla	Al d	Si d	Fe d	Al o	Si o	Fe o	Fe p	Al p	Alo-Ald	Sio-Sid	Alo-Alp	Ald-Alp	Feo-Fep
P RII	0.39	0.53	0.00	0.52	0.30	0.30	0.33	0.45	0.22	0.24	0.20	0.57	0.75	0.89	0.36	0.10	0.73	0.71	0.54	0.00	0.85
Po NaHCO₃	0.68	0.75	0.32	0.76	0.53	0.36	0.69	0.00	0.44	0.41	0.66	0.73	0.75	0.91	0.26	0.24	0.79	0.65	0.70	0.35	0.89
Pi NaHCO₃	0.41	0.56	0.49	0.69	0.46	0.36	0.63	0.00	0.46	0.49	0.56	0.73	0.84	0.97	0.49	0.00	0.85	0.45	0.77	0.47	0.95
Po NaOH	0.57	0.61	0.49	0.83	0.65	0.58	0.57	0.10	0.72	0.57	0.46	0.89	0.81	0.81	0.69	0.45	0.93	0.84	0.87	0.55	0.68
Pi NaOH	0.56	0.63	0.53	0.84	0.62	0.53	0.62	0.10	0.68	0.50	0.54	0.88	0.85	0.89	0.65	0.30	0.96	0.82	0.89	0.57	0.81
Po HCl	0.57	0.20	0.28	0.46	0.76	0.83	0.51	0.17	0.71	0.79	0.10	0.66	0.14	0.10	0.71	0.93	0.32	0.17	0.36	0.39	0.28
Pi HCl	0.28	0.72	0.47	0.20	0.40	0.57	0.17	0.50	0.00	0.00	0.76	0.10	0.46	0.45	0.35	0.53	0.17	0.10	0.33	0.51	0.55
Pi Digestión	0.33	0.41	0.24	0.57	0.36	0.33	0.17	0.14	0.51	0.60	0.22	0.60	0.53	0.40	0.49	0.50	0.62	0.59	0.57	0.35	0.35

Muestras con buena correlación y buena distribución en la gráfica __, muestras con buena correlación

Anexo XIII. Tabla de correlaciones (r) de las propiedades de los suelos con las diferentes extracciones del horizonte Bw

Suelos Húmedos

	pH agua	pH KCl	P Bray	P fij.	C	N	CIC	Arcilla	Al d	Si d	Fe d	Al o	Si o	Fe o	Fe p	Al p	Alo-Ald	Sio-Sid	Alo-Alp	Ald-Alp	Feo-Fep
P RII	0.69	0.14	0.94	0.10	0.20	0.33	0.10	0.10	0.26	0.89	0.73	0.00	0.22	0.54	0.14	0.10	0.00	0.28	0.00	0.37	0.55
Po NaHCO ₃	0.53	0.10	0.93	0.00	0.14	0.30	0.14	0.00	0.17	0.14	0.61	0.14	0.00	0.42	0.28	0.00	0.10	0.41	0.14	0.32	0.42
Pi NaHCO ₃	0.49	0.42	0.51	0.70	0.64	0.70	0.24	0.73	0.56	0.97	0.41	0.91	0.86	0.60	0.10	0.44	0.93	0.99	0.92	0.63	0.61
Po NaOH	0.87	0.51	0.24	0.79	0.71	0.63	0.10	0.75	0.62	0.88	0.89	0.82	0.86	0.96	0.57	0.64	0.81	0.61	0.81	0.57	0.95
Pi NaOH	0.95	0.50	0.41	0.73	0.53	0.45	0.10	0.71	0.44	0.94	0.96	0.73	0.85	0.98	0.48	0.49	0.75	0.52	0.74	0.37	0.98
Po HCl	0.17	0.17	0.37	0.20	0.14	0.00	0.10	0.28	0.17	0.49	0.00	0.35	0.41	0.10	0.47	0.26	0.41	0.56	0.39	0.00	0.14
Pi HCl	0.54	0.40	0.26	0.24	0.40	0.45	0.57	0.20	0.62	0.17	0.32	0.00	0.30	0.24	0.72	0.67	0.10	0.00	0.00	0.55	0.28
Pi Digestión	0.36	0.30	0.46	0.66	0.98	0.96	0.32	0.62	0.90	0.71	0.35	0.83	0.66	0.57	0.53	0.81	0.78	0.77	0.81	0.94	0.56

Suelos Secos

	pH agua	pH KCl	P Bray	P fij.	C	N	CIC	Arcilla	Al d	Si d	Fe d	Al o	Si o	Fe o	Fe p	Al p	Alo-Ald	Sio-Sid	Alo-Alp	Ald-Alp	Feo-Fep
P RII	0.76	0.14	0.89	0.17	0.14	0.26	0.00	0.14	0.22	0.91	0.78	0.10	0.33	0.62	0.14	0.10	0.10	0.17	0.10	0.32	0.62
Po NaHCO ₃	0.75	0.60	0.60	0.69	0.47	0.37	0.24	0.63	0.47	0.71	0.87	0.51	0.57	0.84	0.73	0.60	0.49	0.22	0.49	0.35	0.82
Pi NaHCO ₃	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
Po NaOH	0.71	0.46	0.00	0.77	0.87	0.79	0.17	0.72	0.77	0.77	0.73	0.83	0.79	0.85	0.65	0.77	0.81	0.65	0.82	0.75	0.85
Pi NaOH	0.95	0.56	0.40	0.77	0.54	0.46	0.00	0.75	0.45	0.96	0.97	0.76	0.87	0.99	0.49	0.50	0.78	0.55	0.76	0.39	0.99
Po HCl	0.50	0.60	0.30	0.30	0.00	0.17	0.79	0.33	0.30	0.00	0.30	0.00	0.17	0.26	0.39	0.35	0.00	0.10	0.00	0.24	0.28
Pi HCl	0.97	0.39	0.55	0.60	0.36	0.26	0.10	0.58	0.24	0.95	0.22	0.62	0.78	0.94	0.33	0.30	0.64	0.39	0.62	0.17	0.95
Pi Digestión	0.30	0.30	0.46	0.64	0.99	0.97	0.26	0.59	0.92	0.66	0.28	0.78	0.59	0.52	0.57	0.84	0.73	0.72	0.76	0.95	0.50

Suelos Quemados

	pH agua	pH KCl	P Bray	P fij.	C	N	CIC	Arcilla	Al d	Si d	Fe d	Al o	Si o	Fe o	Fe p	Al p	Alo-Ald	Sio-Sid	Alo-Alp	Ald-Alp	Feo-Fep
P RII	0.98	0.37	0.57	0.57	0.30	0.20	0.10	0.57	0.17	0.97	0.97	0.59	0.77	0.93	0.28	0.24	0.62	0.37	0.60	0.10	0.94
Po NaHCO ₃	0.87	0.59	0.53	0.74	0.51	0.41	0.10	0.71	0.47	0.87	0.95	0.64	0.73	0.93	0.63	0.56	0.64	0.37	0.63	0.36	0.93
Pi NaHCO ₃	0.93	0.30	0.73	0.42	0.10	0.00	0.00	0.42	0.00	0.97	0.93	0.40	0.62	0.84	0.22	0.10	0.44	0.17	0.41	0.10	0.84
Po NaOH	0.79	0.51	0.00	0.83	0.82	0.78	0.20	0.81	0.72	0.91	0.79	0.93	0.92	0.92	0.52	0.70	0.93	0.79	0.93	0.71	0.92
Pi NaOH	0.52	0.22	0.35	0.44	0.63	0.50	0.10	0.35	0.57	0.35	0.58	0.40	0.37	0.62	0.68	0.63	0.35	0.14	0.37	0.49	0.60
Po HCl	0.22	0.69	0.37	0.30	0.17	0.10	0.99	0.30	0.10	0.10	0.00	0.17	0.22	0.00	0.58	0.30	0.20	0.28	0.20	0.00	0.10
Pi HCl	0.20	0.74	0.00	0.41	0.14	0.00	0.89	0.45	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	0.22	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00
Pi Digestión	0.00	0.41	0.28	0.57	0.88	0.86	0.10	0.49	0.94	0.33	0.14	0.50	0.26	0.30	0.84	0.94	0.41	0.37	0.46	0.90	0.28

Muestras con buena correlación y buena distribución en la gráfica __, muestras con buena correlación, buena distribución en la gráfica y pendiente negativa ■, muestras con buena correlación ■ n. d.= no determinado

Anexo XIV .Tabla de correlaciones (r) de las propiedades de los suelos con las diferentes fracciones de P del horizonte Ah

Suelos Húmedos

	pH agua	pH KCl	P Bray	P fij.	C	N	CIC	Arcilla	Al d	Si d	Fe d	Al o	Si o	Fe o	Fe p	Al p	Alo-Ald	Sio-Sid	Alo-Alp	Ald-Alp	Feo-Fep
P No Occ	0.99	0.57	0.00	0.00	0.28	0.28	0.17	0.67	0.33	0.33	0.14	0.00	0.61	0.79	0.10	0.37	0.47	0.616	0.224	0.173	0.831
P o	0.36	0.26	0.37	0.62	0.26	0.51	0.00	0.62	0.62	0.73	0.20	0.79	0.77	0.62	0.78	0.61	0.84	0.458	0.735	0.424	0.510
P Ca	0.98	0.61	0.00	0.14	0.22	0.17	0.10	0.68	0.20	0.20	0.10	0.17	0.69	0.86	0.22	0.28	0.57	0.566	0.332	0.100	0.877
P Occ	0.10	0.48	0.78	0.86	0.85	0.55	0.80	0.10	0.66	0.52	0.45	0.73	0.35	0.42	0.71	0.52	0.70	0.520	0.707	0.574	0.316
P Restante	0.83	0.70	0.45	0.57	0.20	0.14	0.22	0.58	0.22	0.26	0.00	0.58	0.82	0.93	0.57	0.10	0.87	0.742	0.686	0.283	0.883
P Suma fracc.	0.92	0.61	0.20	0.33	0.00	0.00	0.00	0.72	0.00	0.10	0.10	0.39	0.79	0.90	0.42	0.00	0.73	0.648	0.500	0.000	0.883

Suelos Secos

	pH agua	pH KCl	P Bray	P fij.	C	N	CIC	Arcilla	Al d	Si d	Fe d	Al o	Si o	Fe o	Fe p	Al p	Alo-Ald	Sio-Sid	Alo-Alp	Ald-Alp	Feo-Fep
P No Occ	0.52	0.58	0.26	0.40	0.24	0.32	0.28	0.47	0.10	0.14	0.00	0.33	0.51	0.73	0.51	0.26	0.55	0.10	0.32	0.10	0.71
P o	0.57	0.66	0.30	0.76	0.50	0.50	0.50	0.26	0.57	0.62	0.39	0.77	0.85	0.91	0.75	0.54	0.93	0.39	0.80	0.45	0.85
P Ca	0.24	0.41	0.00	0.35	0.14	0.14	0.28	0.41	0.00	0.00	0.17	0.33	0.66	0.86	0.41	0.00	0.60	0.22	0.42	0.00	0.88
P Occ	0.74	0.77	0.50	0.92	0.82	0.64	0.86	0.22	0.72	0.66	0.72	0.84	0.60	0.79	0.81	0.65	0.87	0.20	0.83	0.61	0.70
P Restante	0.00	0.20	0.45	0.44	0.22	0.20	0.24	0.49	0.28	0.26	0.14	0.55	0.83	0.85	0.51	0.17	0.80	0.67	0.66	0.32	0.84
P Suma fracc.	0.47	0.58	0.00	0.55	0.33	0.33	0.40	0.37	0.26	0.30	0.24	0.51	0.72	0.91	0.59	0.28	0.74	0.26	0.56	0.14	0.89

Suelos Quemados

	pH agua	pH KCl	P Bray	P fij.	C	N	CIC	Arcilla	Al d	Si d	Fe d	Al o	Si o	Fe o	Fe p	Al p	Alo-Ald	Sio-Sid	Alo-Alp	Ald-Alp	Feo-Fep
P No Occ	0.45	0.58	0.20	0.62	0.40	0.36	0.42	0.36	0.36	0.37	0.30	0.60	0.77	0.91	0.64	0.36	0.83	0.46	0.66	0.20	0.88
P o	0.63	0.61	0.51	0.87	0.75	0.70	0.63	0.00	0.80	0.79	0.45	0.91	0.69	0.70	0.79	0.75	0.93	0.40	0.87	0.58	0.59
P Ca	0.50	0.53	0.00	0.55	0.58	0.53	0.46	0.39	0.30	0.28	0.10	0.49	0.39	0.62	0.68	0.47	0.65	0.44	0.44	0.00	0.54
P Occ	0.37	0.45	0.37	0.61	0.30	0.24	0.22	0.00	0.53	0.59	0.37	0.63	0.66	0.51	0.44	0.42	0.68	0.59	0.66	0.48	0.47
P Restante	0.20	0.00	0.44	0.28	0.00	0.00	0.10	0.51	0.14	0.14	0.10	0.41	0.84	0.83	0.33	0.00	0.69	0.59	0.57	0.30	0.86
P Suma fracc.	0.54	0.60	0.20	0.69	0.59	0.54	0.51	0.33	0.46	0.45	0.26	0.66	0.62	0.78	0.75	0.53	0.82	0.48	0.65	0.17	0.71

Muestras con buena correlación y buena distribución en la gráfica , muestras con buena correlación 

Anexo XV .Tabla de correlaciones (r) de las propiedades de los suelos con las diferentes fracciones de P del horizonte Bw

Suelos Húmedos

	pH agua	pH KCl	P Bray	P fij.	C	N	CIC	Arcilla	Al d	Si d	Fe d	Al o	Si o	Fe o	Fe p	Al p	Alo-Ald	Sio-Sid	Alo-Alp	Ald-Alp	Fco-Fep
P No Occ	0.89	0.33	0.76	0.45	0.14	0.00	0.00	0.42	0.00	0.94	0.93	0.37	0.57	0.82	0.33	0.17	0.40	0.10	0.37	0.00	0.82
P o	0.89	0.55	0.00	0.81	0.57	0.56	0.14	0.83	0.47	0.99	0.86	0.92	0.99	0.95	0.28	0.45	0.94	0.82	0.93	0.47	0.95
P Ca	0.93	0.33	0.75	0.44	0.00	0.00	0.00	0.42	0.00	0.99	0.94	0.39	0.62	0.83	0.20	0.00	0.44	0.17	0.40	0.10	0.84
P Occ	0.45	0.26	0.44	0.65	0.96	0.93	0.39	0.61	0.84	0.74	0.39	0.85	0.72	0.62	0.45	0.74	0.82	0.81	0.84	0.89	0.61
P Restante	0.88	0.36	0.47	0.60	0.54	0.42	0.14	0.56	0.42	0.79	0.89	0.61	0.71	0.90	0.51	0.48	0.61	0.36	0.60	0.36	0.89
P Suma fracc.	0.98	0.40	0.60	0.57	0.26	0.17	0.00	0.57	0.17	0.98	0.98	0.57	0.77	0.93	0.28	0.22	0.61	0.36	0.58	0.10	0.93

Suelos Secos

	pH agua	pH KCl	P Bray	P fij.	C	N	CIC	Arcilla	Al d	Si d	Fe d	Al o	Si o	Fe o	Fe p	Al p	Alo-Ald	Sio-Sid	Alo-Alp	Ald-Alp	Fco-Fep
P No Occ	0.92	0.35	0.73	0.47	0.17	0.00	0.00	0.45	0.10	0.95	0.94	0.41	0.62	0.85	0.32	0.20	0.45	0.14	0.41	0.00	0.85
P o	0.62	0.62	0.00	0.87	0.90	0.86	0.00	0.82	0.87	0.79	0.69	0.86	0.78	0.83	0.76	0.88	0.82	0.69	0.84	0.82	0.81
P Ca	0.97	0.39	0.55	0.60	0.36	0.26	0.10	0.58	0.24	0.95	0.97	0.62	0.78	0.94	0.33	0.30	0.64	0.39	0.62	0.17	0.95
P Occ	0.30	0.20	0.40	0.57	0.97	0.93	0.35	0.50	0.88	0.57	0.28	0.73	0.56	0.50	0.55	0.80	0.67	0.65	0.71	0.91	0.49
P Restante	0.91	0.35	0.54	0.57	0.46	0.33	0.14	0.53	0.33	0.83	0.92	0.57	0.70	0.90	0.45	0.40	0.58	0.32	0.57	0.26	0.90
P Suma fracc.	0.93	0.47	0.42	0.71	0.55	0.46	0.10	0.68	0.45	0.91	0.95	0.71	0.82	0.96	0.49	0.50	0.72	0.48	0.71	0.39	0.96

Suelos Quemados

	pH agua	pH KCl	P Bray	P fij.	C	N	CIC	Arcilla	Al d	Si d	Fe d	Al o	Si o	Fe o	Fe p	Al p	Alo-Ald	Sio-Sid	Alo-Alp	Ald-Alp	Fco-Fep
P No Occ	0.92	0.36	0.55	0.57	0.44	0.32	0.10	0.54	0.32	0.86	0.93	0.57	0.71	0.91	0.44	0.39	0.59	0.32	0.57	0.24	0.91
P o	0.78	0.65	0.00	0.91	0.81	0.77	0.00	0.88	0.75	0.91	0.82	0.92	0.91	0.94	0.64	0.76	0.91	0.75	0.91	0.71	0.93
P Ca	0.88	0.42	0.17	0.75	0.72	0.65	0.22	0.72	0.60	0.88	0.86	0.84	0.89	0.95	0.48	0.60	0.84	0.66	0.84	0.57	0.95
P Occ	0.10	0.20	0.28	0.44	0.88	0.83	0.14	0.35	0.87	0.26	0.14	0.47	0.24	0.30	0.71	0.84	0.39	0.35	0.42	0.85	0.28
P Restante	0.90	0.32	0.62	0.51	0.36	0.22	0.10	0.48	0.24	0.84	0.92	0.49	0.65	0.87	0.41	0.33	0.51	0.22	0.49	0.17	0.87
P Suma fracc.	0.88	0.46	0.24	0.75	0.70	0.62	0.17	0.72	0.58	0.88	0.88	0.81	0.86	0.95	0.53	0.61	0.81	0.61	0.81	0.55	0.95

Muestras con buena correlación y buena distribución en la gráfica , muestras con buena correlación, buena distribución en la gráfica y pendiente negativa , muestras con buena correlación 