Fraccionamiento de fósforo en una cronosecuencia de suelos en las dunas del suroeste de Australia

Pedro Abel Araúz Madrid

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras
2013-11-01

ZAMORANO
CARRERA DE INGENIERIA EN AMBIENTE Y DESARROLLO

Fraccionamiento de fósforo en una cronosecuencia de suelos en las dunas del suroeste de Australia

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero en Ambiente y Desarrollo en el Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Pedro Abel Araúz Madrid

Zamorano, Honduras
2013-11-01

Fraccionamiento de fósforo en una cronosecuencia de suelos en las dunas del suroeste de Australia

Presentado por:

Pedro Abel Araúz Madrid

Aprobado:

_____
Gloria Arévalo, M.Sc.
Asesora principal

_____
Laura Suazo, Ph.D.
Directora
Departamento de Ambiente y Desarrollo

_____
Benjamin L. Turner, Ph.D.
Asesor

_____
Raúl Zelaya, Ph.D.
Decano Académico

_____
Arie Sanders, M.Sc.
Asesor

Fraccionamiento de fósforo en una cronosecuencia de suelos en las dunas del suroeste de Australia

Pedro Abel Araúz Madrid

Resumen: En los ecosistemas terrestres el fósforo en el suelo es una de las principales limitantes para el desarrollo de las plantas y la productividad del ecosistema. Su disponibilidad en el suelo varía durante el tiempo que transcurran los procesos de pedogénesis sobre el material parental. Los objetivos del estudio se enfocarón en determinar el comportamiento del fósforo en los suelos de diferentes edades en las Dunas de Jurien, Australia y establecer la relación entre las formas del fósforo y la edad de los suelos. Para este estudio se utilizaron seis tipos suelos, que varían en el tiempo de formación (1, 50, 100, 1,200, 5,000 y 15,000 siglos), los cuales fueron extraídos de la bahía de Jurien, Australia. Se evaluaron 10 muestras de suelo por cada cronosecuencia; un total de 60 muestras. Se implementó el fraccionamiento secuecuencial propuesto por Hedley y Stewart en cada muestra, de las cuales se analizó el P orgánico, el P inorgánico y el P total. Se encontró diferencia significativa entre la concentración del fósforo en relación a la edad de los suelos, denterminando que en los suelos muy jovénes y jovénes con edades de 1 a 50 siglos contienen concentraciones promedio de 385 mg kg^{-1}. En suelos muy antiguos con edades promedios de 15 mil siglos, las concentraciones son reducidas a 6 mg kg^{-1}, de las cuales las mayores concentraciones pertenecen a fracciones no disponibles para las plantas (ocluido).

Palabras clave: Extracciones secuenciales, fósforo inorgánico, fósforo orgánico, pedogénesis.

Abstract: In terrestrial ecosystems phosphorus in the soil is one of the main obstacles for the development of plants and ecosystem productivity. Its availability in the soil varies depending on the time that the pedogenesis processes is elapsed on the parent material. The objectives of the study were to determine the behavior of phosphorus in different age soils in the Dunes of Jurien, Australia also establish the relationship between the forms of phosphorus and the soil age. For this study six different types of soil were used with different times of formation (1, 50, 100, 1,200, 5,000 and 15,000 centuries) which were extracted from Jurien Bay, Australia. 10 samples were evaluated for each chronosecuence soil; a total of 60 samples. It was implemented the secuecuencial fractionation proposed by Hedley and Stewart, in which the organic phosphorus, inorganic phosphorus and the total phosphorus were analyzed. Within the study a significant difference between the decrease in the concentration of phosphorus in relation to the age of the soil was found. Soils with the age from 1-50 centuries have an average of 385 mg kg^{-1} of concentration of phosphorus. In older soils with ages of 15 thousand centuries, the concentrations are reduced to 6 mg kg^{-1}, of which the largest concentrations are fractions unavailable to plants (occluded).

Key words: Inorganic phosphorus, organic phosphorus, pedogenesis, sequential extractions

CONTENIDO

Portadilla i
Página de firmas ii
Resumen iiii
Contenido iv
Índice de cuadros, figuras y anexos v

1. INTRODUCCIÓN 1

2. MATERIALES Y MÉTODOS 3

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 6

4. CONCLUSIONES 14

5. RECOMENDACIONES 15

6. LITERATURA CITADA 16

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros Página

1. Procedimiento secuencial para el fraccionamiento de fósforo. 4
2. Concentraciones de fósforo en las extracciones secuenciales en suelos de las Dunas de Jurien, Australia. 8
3. Fósforo en suelos de las Dunas de Jurien, Australia, expresadas las proporciones presentes en el suelo. 11

Figuras Página

1. Modelo conceptual de las variaciones de fósforo (P) en el suelo durante la pedogénesis, en cada una de sus formas. 2
2. Posición relativa de tres sistemas de dunas en seis subdivisiones. La distancia entre la última duna y la costa es de 10 km. 3
3. Variación de fósforo en el suelo durante el periodo de formación de las dunas…..... 6
4. Tasa de pérdida de fósforo en cada siglo de formación de las Dunas..... 7
5. Proporciones de las fracciones de fósforo en la cronosecuencia de la bahía de Jurien, Australia. 9
6. Comportamiento de las fracciones de fósforo en diferentes periodos de formación de suelos, presente en las dunas de Jurien, Australia 10
7. Comportamiento de las fracciones de fósforo orgánico y inorgánico a través de un periodo aproximado de 20 mil siglos de formación de suelo. 12
8. Fracciones de fósforo orgánico en la cronosecuencia de la bahía de Jurien, Australia. 13

1. INTRODUCCIÓN

El fósforo en el suelo no es abundante como es el caso del nitrógeno, pero es mucho menos susceptible a perdidas por lixiviación y no cambia a forma gaseosa. El fósforo total en el suelo se encuentra en una proporción de 0.005 a 0.15% (Whalen y Sampedro 2010).

En las dunas de arenas como en los demás ecosistemas terrestres, el fósforo en el suelo es una de las principales limitantes para el desarrollo de las plantas y la productividad del ecosistema (Cerrón y Aristizábal. 2012). Su disponibilidad en el suelo varía después que el material parental (dunas costeras, flujo de lava o materia orgánica) transcurra por los procesos de formación, durante largos periodos de tiempo (Odum 1969). El fósforo en el suelo se acumula y solamente se pierde por erosión del material de origen y por la absorción de las plantas, por lo que la cantidad total disponible disminuye con el tiempo, hasta convertirse en un limitante en los suelos antiguos (Beadle 1954).

Las formas del fósforo en el suelo evolucionan de acuerdo al origen del mismo y a la edad (Figura 1). En la primera etapa de desarrollo del suelo, se encuentra fósforo en su forma de minerales primarios ligados al calcio (principalmente apatita). A través del tiempo el mismo se disuelve lentamente por los procesos de meteorización (Reed *et al*. 2011). El fósforo no ocluido o disponible para a las planta y los microorganismos, corresponde mayormente a la forma inorgánica, ya sea su forma mineral primaria ($H_2PO_4^-$) o secundaria (HPO_4^{-2}) y el ion ortofosfato. La concentración de estos iones en la solución de suelo depende del pH. En suelos ácidos domina el H_2PO_4, mientras que el HPO_4^{-2} domina en un rango de pH de 6 a 7 (Tan 2009). Dentro de la parte no ocluida se encuentra una pequeña porción de fósforo orgánico fácilmente mineralizable (Picone y Zamuner 2002).

Las fracciones de fósforo orgánico representa cerca del 50% del fósforo en el suelo, dependiendo del material parental y el proceso de pedogénesis (Whalen y Sampedro 2010). Está forma de fósforo orgánico, corresponde al fósforo que ha sido absorbido por las plantas por medio de procesos biológicos. El fósforo ocluido (Figura 1), corresponde al fósforo que ha sido extraído de la parte soluble y retenido por las arcillas, en su mayoría arcillas caolinitas (Tisdale *et al.* 1993).

En la Isla de Barro Colorado, Republica de Panamá, se ha utilizado el método de fraccionamiento secuencial (Hedley y Stewart 1982; Agbenin y Tiessen 1995), para conocer las diferentes formas químicas de fósforo presente en los suelos tropicales. De esta forma se obtiene mayor información del ciclo de fósforo en los ecosistemas de bosques tropicales (Dieter et al. 2010).

Los estudios anteriores en las cronosecuencias de dunas de la Bahía de Jurien (Australia), han analizado los nutrientes del suelo que limitan el desarrollo de estos ecosistema, en suelos con una cronosecuencia de 20 mil siglos en la formación de suelos. Y demostraron que el fósforo es una de las principales limitantes en las dunas más antiguas (Laliberté et al. 2012).

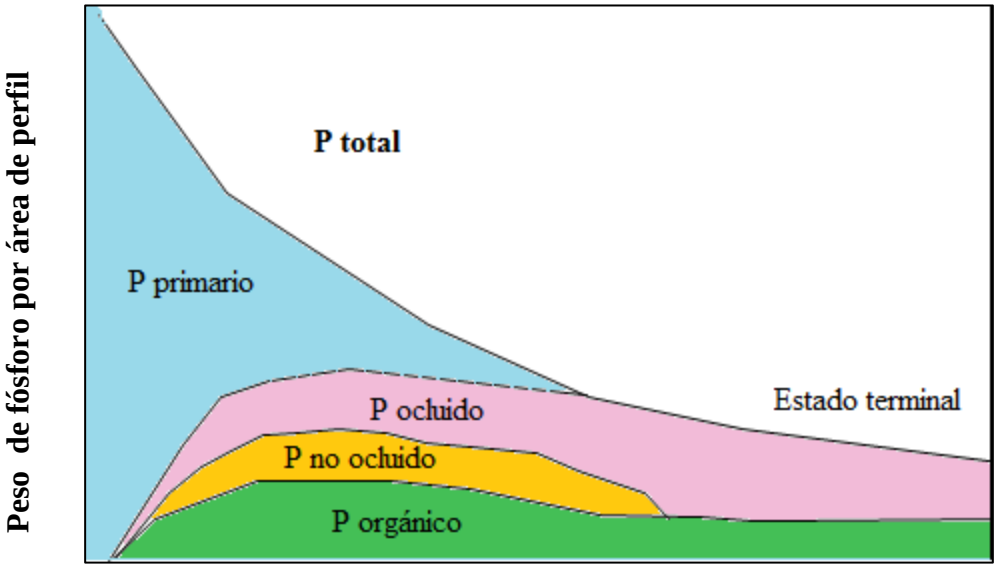

Figura 1. Modelo conceptual de las variaciones de fósforo (P) en el suelo durante la pedogénesis, en cada una de sus formas.
Modelo propuesto por Walker y Syers en 1996
Fuente: Turner y Condron 2013.

Este estudio se realizó en el Instituto Smithsonian de Investigación Tropical en suelos procedentes de la bahía de Jurien, Australia; a los cuales se aplico el fraccionamiento secuencial. La principal limitante se debió a que la metodología no funciona correctamente en suelos con concentraciones muy bajas de fósforo. Para resolver esta problemática se aumentó la cantidad de muestra de suelo (2.5 g) para las dunas antiguas y en las dunas jóvenes se mantuvierón los valores recomendados en la metodología (0.5 g) (Hedley y Stewart 1982; Reetz 2007).

Objetivos del estudio:

- Determinar el comportamiento de fósforo en suelos de diferentes edades en las dunas de Jurien, Australia.
- Establecer la relación entre las formas del fósforo y la edad de los suelos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se realizó con muestras de suelos procedentes de las dunas de la bahía de Jurien, Australia, ubicada a 225 kilometros al norte de Perth. El clima de la zona de estudio es mediterráneo, con veranos cálidos y secos e inviernos fríos y húmedos. La precipitación media anual es de 535 mm, datos de 1981 - 2010; el 80% de la precipitación cae en el invierno (mayo-septiembre). La temperatura media anual es de 25 °C y la evapotranspiración potencial media anual es de 1,500 mm, datos de 1961 – 1990 (Oficina Australiana de meteorología 2013).

Dentro de estas dunas se encuentran tres principales sucesiones litoestratigráficas en secuencia pedogenética: duna Quindalup muy joven (~1-10 siglos), joven (~10-50 siglos), edad media (~100 siglos); duna Spearwood moderadamente antigua (~1,200 siglos), antigua (~2,000-5,000 siglos) y duna Bassendean antigua (~10-20 mil siglos) (Figura 2). Estas asociaciones se interpretan generalmente como representaciones definidas de los ecosistemas marinos y las dunas, cuyas edades aumentan desde la costa hasta tierra adentro (McArthur y Bettenay 1974; Laliberté *et al.* 2012).

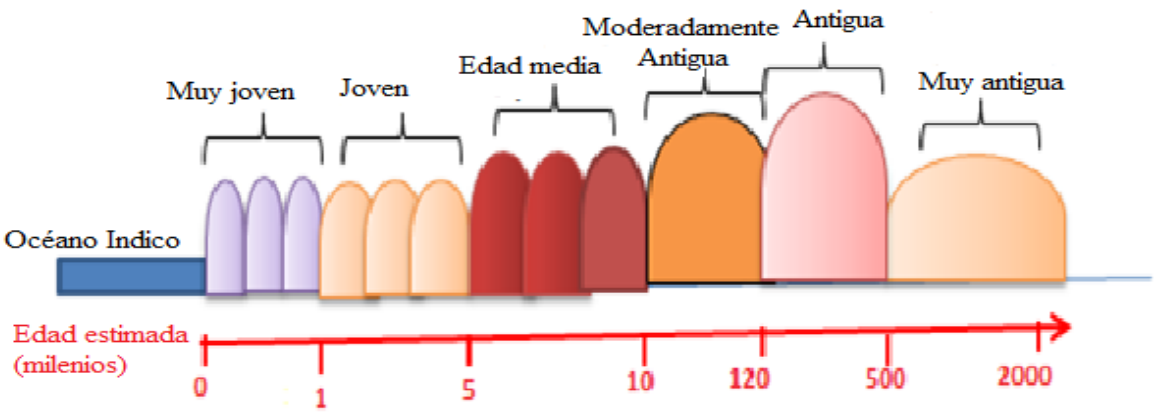

Figura 2. Posición relativa de las dunas Quindalup, Spearwood, Bassendean en seis subdivisiones. La distancia entre la última duna y la costa es de 10 km de la bahía de Jurien, Australia, ubicada a 225 kilometros al norte de Perth.
Fuente: McArthur y Bettenay 1974; Laliberté *et al.* 2012.

Para realizar el fraccionamiento del fósforo se realizarón extracciones secuenciales, agregando 0.5 g de muestra de suelo en tubos plásticos para centrifuga de 35 ml y se prosiguió de acuerdo con el procedimiento propuesto por Hedley (Cuadro 1) (Hedley y Stewart 1982; Reetz 2007). Se utilizó un blanco (no suelo) y una muestra estándar del laboratorio de suelo (extraído del bosque tropical Albrook, Republica de Panamá).

Para medir el fósforo inorgánico todas las extracciones fueron centrifugadas (8,180 rpm, durante 10 min.) y se tomó una alícuota para los análisis. Está alícuota se neutralizó con hidróxido de sodio 1M (base) o ácido sulfúrico 1M (ácido) como era conveniente en cada extracción. Después que la muestra fue neutralizada se agregó el reactivo de trabajo, el cual reaccionó con los fosfatos.

Cuadro 1. Procedimiento secuencial para el fraccionamiento de fósforo.

Procedimiento		**Estracto**	**Fracción de fósforo (P)**
0.5 g Suelo ↓ Residuo	Agita con agua y resina por 24 h, centrifugar.	P-Resina	P biologicamente asimilable (P no ocloido)
↓	Agitar con $NaCO_3$ O.5M pH 8.5 por 16 h, centrifugar.	Pt-$NaCO_3$ Po-$NaCO_3$ Pi-$NaCO_3$	P disponible (P no ocluido)
Residuo	Agitar con NaOH 0.1M 16 h, centrifugar.	Pt-NaOH Po-NaOH Pi-NaOH	P ligado al Fe y Al (P ocluido)
↓ Residuo	Agitar con HCl 1M por 16 h, centrifugar	Pi-HCl	P ligado con Ca (P primario)
↓ Residuo	Digestión, Agitar con H_2SO_4 1M por 16 h, centrifugar	Pr- H_2SO_4	P residual

P: fósforo, Pi: fósforo inorgánico, Po: fósforo orgánico, Pt: fósforo total.
Fuente**:** Hedley y Stewart 1982; Agbenin y Tiessen 1995.

Los fosfatos fuerón determinados por el método de colorimetría. El molibdato de amonio y el tartrato antimónico potásico reaccionan en un medio ácido con los ortofosfatos y forman ácido fosfomolíbdico, que se freduce a azul de molibdeno de intenso color por el ácido ascórbico. El molibdato de amonio, tartrato antimónico potásico y ácido ascórbico se encuentran en el reactivo de trabajo. La absorbancia de la solución (azul) se midió a 880 nm, el color es estable alrededor de 12 horas de acuerdo a la literatura, pero fue medida en las primeras dos horas (Murphy y Riley, 1962). Usando un Lachat Quickchem 8500 (Hach ltd, Loveland,Co). Antes de analizar, se calibró la máquina con cinco

estándares de fosfatos (0.0, 0.5, 1.0, 2.0 y 4.0 mg L^{-1}), para las distintas extracciones con diluciones similares a las muestras, en cada ejecución realizada.

El fósforo total se determinó por el mismo método, después de una ignición (550 °C, 1h) a cada una de las muestras, y una extracción con ácido sulfúrico 1M (1:50 suelo: ácido sulfúrico 1M, 16 hr.). El fósforo orgánico se determinó por la diferencia de fósforo total extraído de la oxidación con persulfato ($K_2S_2O_8$) y fósforo inorgánico, en cada una de las extracciones (Rowland y Haygarth 1997). El pH de los suelos cada una de las dunas se determinó en una relación 1:2 de solución en agua, utilizando un electrodo de vidrio (Turner 2006). Con los datos obtenidos del fósforo total en cada una de las edades se calculó la tasa de pérdida de fósforo en cada 100 años de formación de suelo.

Las variables determinadas en este estudio son: fósforo total, fósforo orgánico, fósforo inorgánico, fósforo primario, fósforo ocluido y fósforo no ocluido; las cuales fueron observadas en seis tratamientos que consisten en suelos de diferentes edades (Laliberté *et al*. 2012; Griffin y Burbidge 1990). Los tratamientos utilizados en el estudio son:

a) Forma de P en suelos muy jóvenes Quindalup.
b) Forma de P en suelos jovenes Quindalup
c) Forma de P en suelos de edad mediana Quindalup.
d) Forma de P en suelos moderadamente antiguos Spearwood
e) Forma de P en suelos antiguos Spearwood.
f) Forma de P en suelos muy antiguos Bassendean.

Se aplicó un diseño de parcelas divididas, para analizar 10 muestras representativas de cada sistema de dunas o tratamientos, de acuerdo con estudios previos (Laliberté *et al.* 2012); se obtuvo un total de 60 muestras para el análisis de fraccionamiento de fósforo. Las muestras de suelos fueron recolectadas en junio de 2012 y se analizarón en el laboratorio de Suelo del Instituto Smithsonian de Investigación Tropical-Panamá.

Los resultados de laboratorio sobre las concentraciones de fósforo en los tratamientos, se analizarón a través de un ANOVA (Pardo y Ruíz 2001), con un nivel de significancia del 5%. Los análisis se llevarón a cabo a través del uso del programa estadístico SPSS versión 19.0.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Existe diferencia entre las concentraciones de fósforo en los suelos jóvenes y los suelos antiguos, debido a que los suelos de las dunas Quindalup muy jóven y jóven con edades de 1 a 50 siglos presentan un rango de concentraciones de fósforo de 370 a 436 mg kg^{-1}; en comparación a las dunas Bassendean que presentan edades entre 10-20 mil siglos, donde las concentranciones de fósforo son reducidas hasta un 6 mg kg^{-1} (Figura 3). Las concentraciones decrecientes de fósforo durante el proceso de formación (pedogénesis) de los suelos de la bahía de Jurien, Australia, van de acuerdo con los resultados encontrados en otras investigaciones (Turner y Condron 2013).

Los suelos presentes en el estudio son considerados como básicos, ya que dentro de las mediciones de pH se encontrarón valores de 9.26, 8.57, 8.56, 6.58, 6.36, 5.85 en suelos con edades de 1, 50, 100, 1200, 5000 y 15000 siglos respectivamente. Pero podemos observar que durante la formación de estos suelos se ha generado una acidificación.

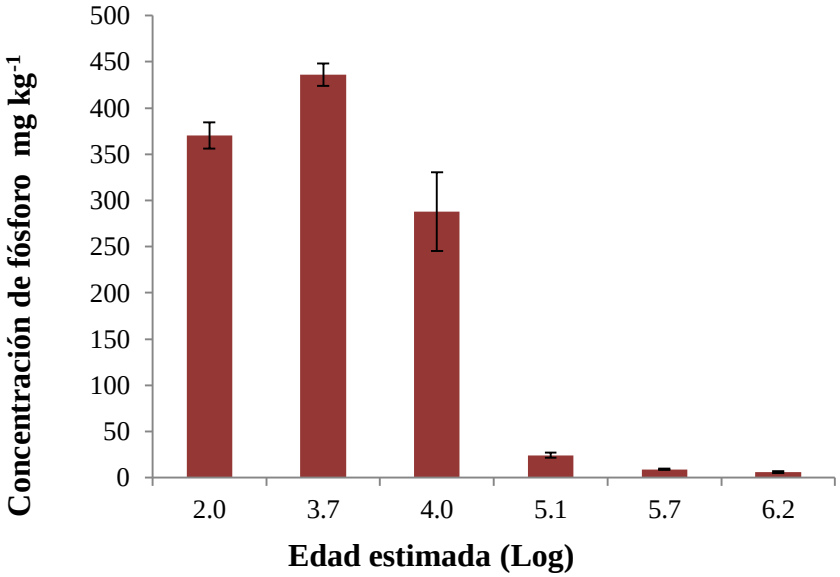

Figura 3. Variación de fósforo durante el periodo de formación de los suelos de la bahía de Jurien, Australia.
Se muestran las medias ± error estándar. Con un intervalo de confianza del 95%
($P \leq 0.05$). Los valores de logaritmo 2.0, 3.7, 4.0, 5.1, 5.7 y 6.2 representan a las edades de los suelos de 1, 50, 100, 1,200, 5,000 y 15,000 siglos, respectivamente.

La máxima tasa de pérdida de fósforo en estos suelos ocurre en edades de 100 siglos con valores de 1.39 mg kg^{-1} por cada siglo de formación de suelos. Después de este tiempo se reduce la tasa de pérdida de fósforo, presentando valores de 0.03 mg kg^{-1} por cada siglo de formación de suelos en la cronosecuencia muy antigua (~10-20 mil siglos) (Figura 4).

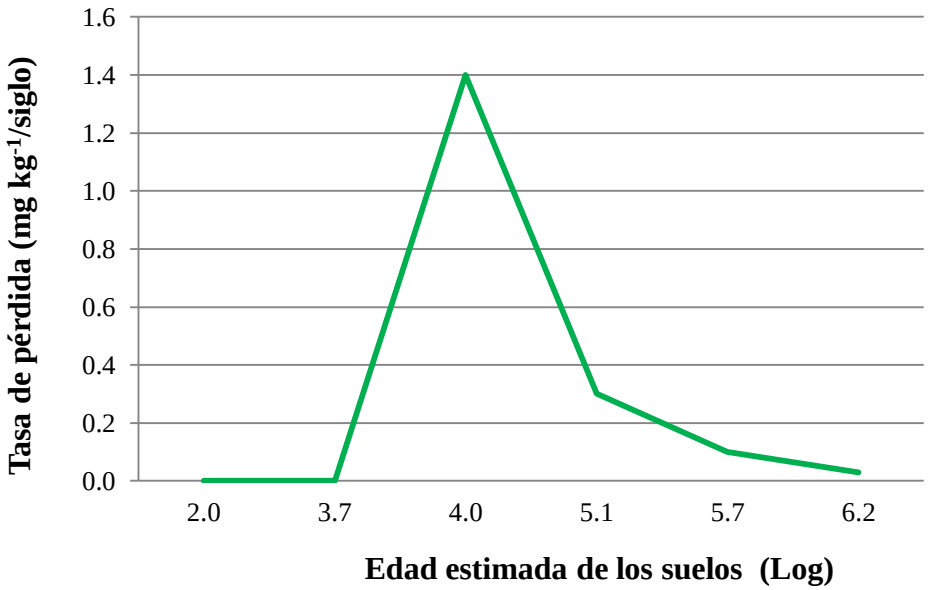

Figura 4. Tasa de pérdida de fósforo en cada siglo de formación de los suelos de la bahía de Jurien, Australia.
Los valores de logaritmo 2.0, 3.7, 4.0, 5.1, 5.7 y 6.2 representan a las edades de los suelos de 1, 50, 100, 1,200, 5,000 y 15,000 siglos, respectivamente.

El método de fraccionamiento secuencial de Hedley y Stewart (1982) permite diferenciar cada una de las formas de fósforo presente en los diferentes periodos de formación de los suelos. Gracias a esta ventaja del método se demostró que el fósforo disponible para las pantas y microorganismos (fósforo biológicamente asimilable y fósforo disponible) representan solo una pequeña fracción del fósforo total encontrado en el suelo. La mayores concentraciones de fósforos en estos suelos es dada por formas poco disponibles para las plantas (fósforo primario, ocluido y residual) (Cuadro 2, Figura 5).

Cuadro 2. Concentraciones de fósforo en las extracciones secuenciales en suelos de las Dunas de Jurien, Australia.

Fracciones de fósforo	Fracciones de fósforo en cada cronosecuencia (mg kg-1)												F	Sig.
	Muy Joven		Joven		Edad Mediana		Moderadamente Antigua		Antigua		Muy Antigua			
	Media	EE	Media	EE	Media	EE	Media	EE	Media	EE	Media	EE		
P no ocluido ¥	1.42	0.13	2.09	0.46	1.22	0.11	1.07	0.09	0.43	0.05	0.47	0.03	9.25	0.00
P no ocluido €	29.64	4.37	44.02	6.49	20.20	2.98	2.89	0.34	1.16	0.18	0.94	0.13	27.42	0.00
P ocluido	1.63	0.49	7.14	1.31	7.94	1.43	5.79	0.57	2.87	0.33	2.25	0.28	9.64	0.00
P primario	318.90	11.97	343.03	11.60	188.73	41.68	0.69	0.16	0.29	0.05	0.40	0.06	79.79	0.00
Residual P	5.72	0.88	19.65	1.20	29.17	2.23	9.66	1.36	3.07	0.31	1.47	0.17	76.86	0.00
P total β	355.89	10.38	413.83	14.88	246.03	44.42	19.03	2.20	7.40	0.76	5.05	0.45	91.56	0.00
P total α	370.10	14.38	435.87	12.04	287.92	42.70	24.33	2.78	9.09	0.83	5.98	0.88	107.96	0.00
P inorgánico total	348.18	11.04	378.69	15.25	198.94	43.55	2.75	0.38	1.63	0.19	1.53	0.21	85.03	0.00
P orgánico total	1.99	0.60	15.49	1.69	17.93	2.53	6.62	0.70	2.69	0.42	2.05	0.33	29.52	0.00

(EE) error estándar ($P \leq 0.05$).

¥ Esta fracción de fósforo pertenece a la forma de P biológicamente asimilable, extraido por resina.

€ Esta fracción de fósforo pertenece a la forma de P disponible, extraido por $NaHCO_3$.

β La sumatoria incluye los valores de fósforo no ocluido, ocluido, primario y residual; obtenidos de las extracciones secuenciales.

α El fósforo total fue análizado por la digestios de las muestras con H_2SO_4.

Al observar las proporciones de cada una de las fracciones de fósforo, en los suelos moderadamente antiguos (~1,200 siglos), antiguos (~2,000-5,000 siglos) y muy antigos (~10-20 mil siglos) predominan las fracciones de P residual y P ocluido (Figura 5). Las fracciones P ocluido son consideradas moderadamente disponible ó lábil asociado a fosfatos cristalinos o amorfos de Fe y Al; mientras que el P residual representa al fósforo muy estable ó fósforo recalcitrante (Agbenin y Tiessen 1995). Por lo tanto, estás fracciones no satisfacerán las necesidades de las plantas y los microorganismos a corto plazo.

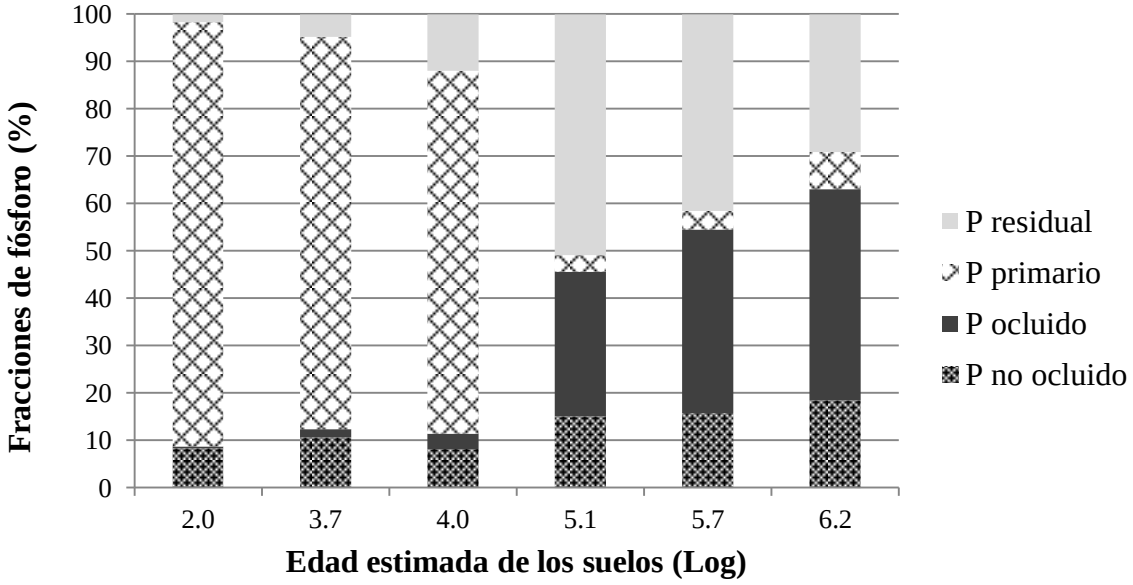

Figura 5. Proporciones de las fracciones de fósforo en los suelos de la bahía de Jurien, Australia.
Intervalo de confianza del 95%. Los valores de logaritmo 2.0, 3.7, 4.0, 5.1, 5.7 y 6.2 representan a las edades de los suelos de 1, 50, 100, 1,200, 5,000 y 15,000 siglos, respectivamente.

Se ha mencionado que la concentraciones totales de fósforo en estos suelos presentán una redución en su concentraciones en suelos antiguos (Figura 3). Pero cada una de las fracciónes desarrollán un comportamiento distinto a lo largo de su periodo de formación.

A medida que se descompone el fósforo presente en el material parental, el fósforo no ocluido aumenta hasta 44 mg kg^{-1} en 50 siglos y disminuye a 1 mg kg^{-1} en 15 mil siglos (Figura 6 A). El fósforo no ocluido se transforma en fósforo ocluido, logrando una concentración de 8 mg kg^{-1} en edades de 100 siglos y diminuye hasta 2 mg kg^{-1} en los 15 mil siglos de formación (Figura 6 B). El fósforo primario presenta concentraciones de 344 mg kg^{-1} en los primeros 50 siglos y sus valores disminuyen constantemente hasta llegar a 0.7 mg kg^{-1} en suelos de 15 mil siglos (Figura 6 C). Mientras que el fósforo residual incrementa hasta 29 mg kg^{-1} en edades de 100 siglos y disminuye a 1.5 mg kg^{-1} para los 15 mil siglos (Figura 6 D).

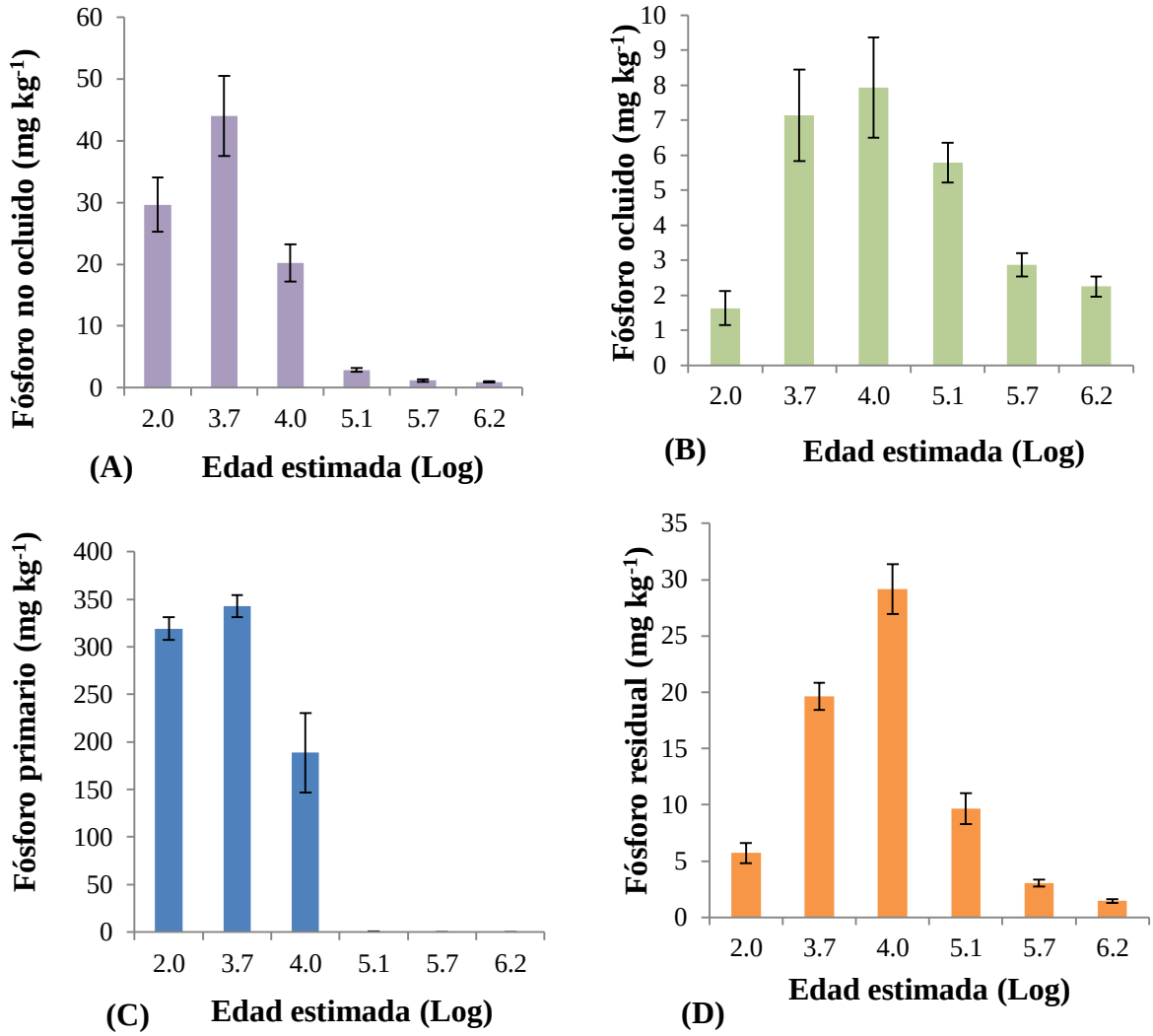

Figura 6. Comportamiento de las fracciones de fósforo (A, B, C y D) en diferentes periodos de formación de suelos, presente en las dunas de Jurien, Australia.
Medias ± errores estándar, con un intervalo de confianza del 95%. Los valores de logaritmo 2.0, 3.7, 4.0, 5.1, 5.7 y 6.2 representan a las edades de los suelos de 1, 50, 100, 1,200, 5,000 y 15,000 siglos, respectivamente.

En los suelos con 1 a 10 siglos de formación, el fósforo inorgánico representa 97%, donde 89.47% esta compuesto por el fósforo primario (ligado al Ca), 0.02% al fósforo ligado con el Al y Fe y 8.28% es fósforo disponible, el cual se encuentra en la parte soluble del suelo y disponible para las plantas y microorganismos. En el esenario de suelos con edades de 10 siglos a 15 mil siglos el fósforo inorgánico se ha reducido a 31.41% del fósforo total de estos suelos, de los cuales 8.36% representa a la presencia de fósforo primario, 17.05% de este fosforo se encuentra en la fase soluble y 6% esta ligado al Al y Fe (Cuadro 3).

.

Cuadro 3. Fósforo en los suelos de las Dunas de Jurien, Australia, expresadas las proporciones presentes en el suelo.

Fracciones de fósforo	Extractante	Fósforo en cada cronosecuencia (%)					
		Muy Joven (~1-10)$^{\Omega}$	**Joven (~10-50)$^{\Omega}$**	**Edad Mediana (~100)$^{\Omega}$**	**Moderadamente Antigua (~1,200)$^{\Omega}$**	**Antigua (~2-5 mil)$^{\Omega}$**	**Muy Antigua (~20 mil)$^{\Omega}$**
P orgánico	$NaHCO_3$-Po	0.12	2.19	4.88	12.03	5.86	1.81
	NaOH-Po	0.46	1.60	3.81	23.25	29.09	6.00
P inorgánico	$NaHCO_3$-Pi	8.28	8.23	3.96	3.20	9.21	17.05
	NaOH-Pi	0.02	0.16	0.19	7.79	9.52	37.43
	HCl-Pi	89.47	83.01	70.18	3.46	3.84	8.36
Residual	H_2SO_4-Pr	1.65	4.80	16.98	50.27	42.47	29.35
Total		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Los valores representan las medias ± la desviación estándar.
Los resultados se presentán un intervalo de confianza del 95% ($P \leq 0.05$).
$^{\Omega}$ Edad estimada de los suelos en siglos.

En los primeros 1,200 siglos de formación, las fracciones de fósforo inorgánico predominan en los suelos de las dunas de Jurien, Australia. Las fracciones de forma orgánica aumenta con la aparición de la vegetación en los suelos jóvenes (10-50 siglos) y posteriormente disminuye su concentración en los suelos antiguos y el fósforo residual incrementa en edades de 100 siglos y consecutivamente reduce en suelos muy antiguos (Figura 7).

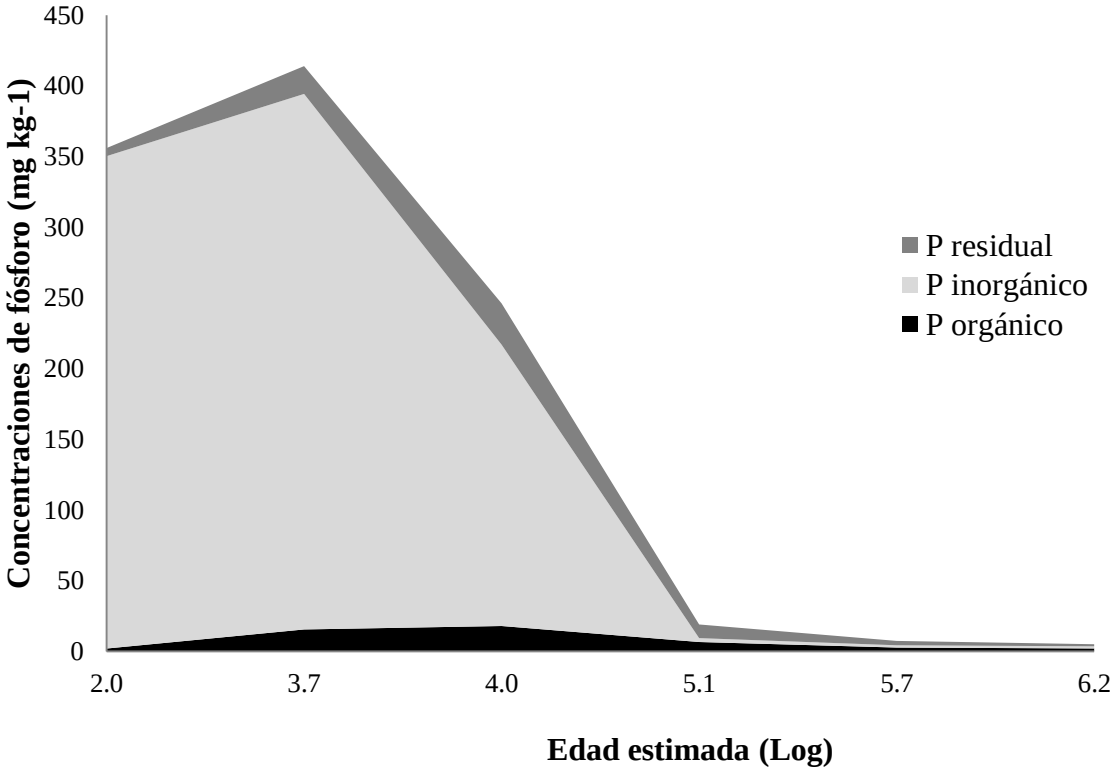

Figura 7. Comportamiento de las fracciones de fósforo orgánico y inorgánico a través de un periodo aproximado de 15 mil siglos de formación de suelo en la bahía de Jurien, Australia.
Se presenta con un intervalo de confianza del 95% ($P \leq 0.05$). Los valores de logaritmo 2.0, 3.7, 4.0, 5.1, 5.7 y 6.2 representan a las edades de los suelos de 1, 50, 100, 1,200, 5,000 y 15,000 siglos, respectivamente.

Las fracciones de fósforo ocluido y no ocluido (Cuadro 2), presentan valores de fósforo orgánico e inorgánico (Figura 8 A). El método de Hedley y Stewart (1982) permite separar cada fracción y evaluar la participación de la materia orgánica en cada forma (Cuadro 3).

Las concentraciones de fósforo orgánico encontradas en estos suelos se distribuyen en la fracción ocluida y la no ocluida (Figura 8 B y C). El mayor contenido de fósforo ligado a la materia orgánica ocurre en lo suelos moderadamente antiguos (120,000 años) donde el fósforo no ocluido (extraído con $NaHCO_3$), corresponde 15%, del cual 12% es dado en forma de fósforo orgánico y 3% por el fósforo inorgánico (Cuadro 8 B); mientras que en edades de 2,000 – 5,000 siglos 39% del fósforo en el suelo corresponde a la fracción de fósforo ocluido, donde 29% es dado por el fósforo organico y 10% por el fósforo inorgánico (Figura 8 C).

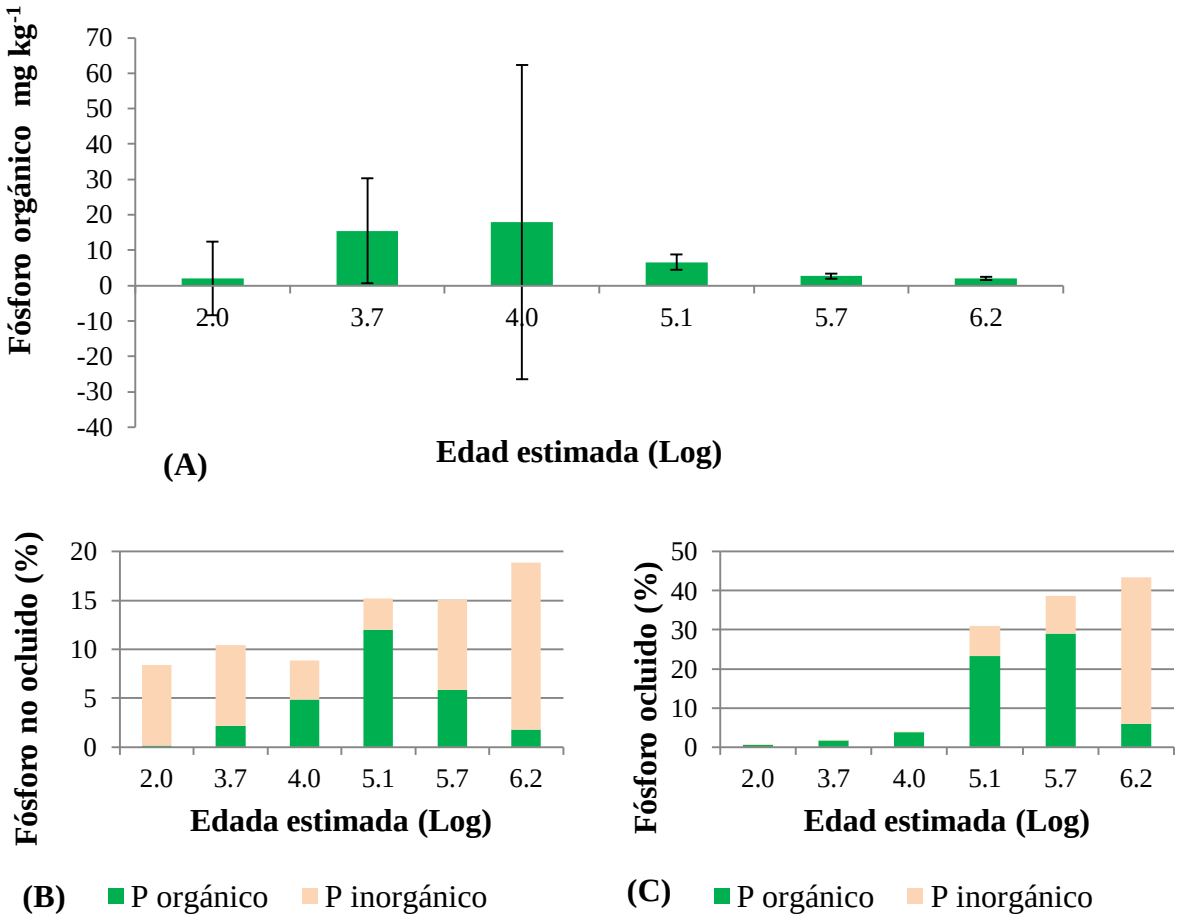

Figura 8. Fracciones de fósforo orgánico en los suelos de la bahía de Jurien, Australia. Los valores de logaritmo 2.0, 3.7, 4.0, 5.1, 5.7 y 6.2 representan a las edades de los suelos de 1, 50, 100, 1,200, 5,000 y 15,000 siglos, respectivamente.

4. CONCLUSIONES

- Las concentraciones de fósforo en los suelos de las dunas de Jurien, Australia, se mantienen durante los primeros 50 siglos, a partir de los cuales disminuyen a través del proceso de formación del suelo o pedogénesis, de modo que el fósforo llega a tener mínimas concentraciones en los suelos muy antiguos con una edad promedio de 15 mil siglos.

- La pérdida de fósforo en los suelos se genera en velocidades variables con relación a la edad; a los 50 siglos la tasa de pérdida incrementa hasta 1.39 mg kg^{-1}/siglo, hasta los 100 siglos cuando disminuye gradualmente hasta 0.3 mg kg^{-1}/siglo a los 1,200 siglos. A partir de esa edad la tasa de pérdida de fósforo se reduce a menos de 0.2 mg kg^{-1}/siglo.

- La pérdida intensa de fósforo se genera a partir de los 50 hasta 1,200 siglos cuando llega a valores de 24 mg kg^{-1}, cantidad que prosigue en reducción hasta edades de 15 mil siglos donde tienen concentraciones de 6 mg kg^{-1}.

- Las fracciones de forma inorgánicas de fósforo en estos suelos, tienen mayores concentraciones en suelos de edades muy joven (~1 - 10 siglos), joven (~10 - 50 siglos) y edad media (~100 siglos) y posteriormente sus valores son reducidos.

- Las fracciones de formas orgánicas del fósforo en estos suelos, aumenta con la aparición de la vegetación en los suelos jóvenes (10 - 50 siglos). En los suelos moderadamente antiguos con edades de 1,200 siglos la presencia de materia orgánica genera una gran importancia en la dispobilidad del fósforo para las plantas y los microorganismos.

5. RECOMENDACIONES

- De acuerdo a la información generada en los suelos de la bahía de Jurien, Australia, es recomendable utilizar el método de fraccionamiento secuencial de fósforo como una herramienta que permita conocer el envejecimiento de los suelos y crear bases para la elaboración de un plan de manejo de suelos.

- Aplicar el método de fraccionamiento secuencial en los suelos agrícolas, con el objetivo de conocer las concentraciones de fósforo disponisponible y potenciales para las plantas y los microorganismos.

- Realizar estudios con el uso del fraccionamiento secuencial en los suelos de la Escuela Agrícola Panamericana de vocación forestal en áreas que han sido afectadas por incendios y compararla con áreas no afectadas. De esta forma, se logrará determinar el efecto de los incendios forestales sobre la pérdida de las concentraciones de fósforo, en relación a las formas de fósforo orgánico.

6. LITERATURA CITADA

Agbenin, J.O., H. Tiessen. 1995. Phosphorus Forms in Particle-Size Fractions of a Toposequence from Northeast Brazil. Soil Society of America Journal 59: 1687-1693.

Beadle, N. 1954. Soil phosphate and the delimitation of plant communities in Eastern Australia. Journal of Ecology 35(3):370-375.

Cerrón, L., F. Aristizábal. 2012. Dinámica del ciclo de nitrógeno y fósforo en el suelo. Revista Colombiana de Biotecnología 14:285-295.

Dieter, D., H. Elsenbeer y B. Turner. 2010. Phosphorus fraction in lowland tropical rainforest soils in central Panama. Journal of soil science- hydrology- geomorphology, 82(2):118-125.

Griffin, E.A., A.A. Burbidge. 1990. Nature Conservation, Landscape and Recreation Values of the Lesueur Area. *In*: A.A. Burbidge., S.D. Hopper y S. van Leeuwen (ed). Description of the Region. Environmental Protection Authority, Perth, Western Australia. 424:15-24.

Hedley M.J., J.W.B. Stewart. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. Soil science society of America journal 46(5):970-976.

Laliberté, E., B. Turner y T. Costes. 2012. Experimental assessment of nutrient limitation along a 2-million-year dune chronosequence in the south-western Australia biodiversity hotspot. Journal of Ecology, 100(3):631-642.

McArthur, W. 2004. Reference Soils of South-Western Australia, 2nd (ed). Department of Agriculture, Australian Society of Soil Science. 285 p.

McArthur, W., E. Bettenay. 1974. Development and Distribution of Soils of the Swan Coastal Plain, Western Australia, CSIRO, Australia. 55 p,

Murphy, J.R., J.P. Riley. 1962. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. Analytica Chimica Acta 27: 31-36.

Odum, E. 1969. The strategy of ecosystem development. Journal of science 164(3877):262-270 p.

Oficina Australiana de Meteorología. 2013. Información Climatica. Consultada en abril de 2013. Disponible en: http://www.bom.gov.au

Pardo, A., M. Ruíz. 2001. Spss 10.0:Guía para el análisis de datos. 567 p.

Picone, L., E. Zamuner. 2002. Fósforo orgánico y fertilidad fosfórica. Informaciones Agronómicas del Cono Sur 16:11-15.

Reed, S.C., A.R. Townsend., P.G. Taylor y C.C Cleveland. 2011. Phosphorus Cycling in Tropical Forests Growing on Highly Weathered Soils. Soil Biology 100:339-369.

Reetz, D. 2007. Secuencial fractionation for inorganic and organic phosphorus. Smithsonian Tropical Research Institute, Soil lab. 3 p.

Rowland, A.P., P.M Haygarth. 1997. Determination of total dissolved phosphorus in soil solutions. Journal of Environmental Quality 26(2):410-415.

Tan, K.H. 2009. Environmental Soil Science: Dissolved Solid Substances, Phosphorus. 400 p.

Tisdale, S.L., L.N. Werner., J.D. Beaton y J.L. Havlin. 1993. Soil Fertility and Fertilizers. 430 p.

Turner, B. 2006. Measurement of Soil pH (1:2 water and $CaCl_2$). Smithsonian Tropical Research Institute, Soil Lab. 1 p.

Turner, B., L. Condron. 2013. Pedogenesis, nutrient dynamics, and ecosystem development: the legacy of T.W. Walker and J.K. Syers. Journal of Soil-Plant 367:1-10 p.

Whalen, J. K., L. Sanpedro. 2010. Soil Ecology & Management. 296 p.