

# Efecto del uso del suelo en las formas y disponibilidad de fósforo de un Andisol de la Meseta P'urhépecha, Michoacán

## Effects of land use on phosphorus fractions and availability in an Andisol from the P'urhépecha Plateau, Michoacán

Jeannette S. Bayuelo Jiménez<sup>1‡</sup>, Iván Ochoa<sup>2</sup>, Eulogio de la Cruz Torres<sup>3</sup> y Takashi Muraoka<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Carretera Morelia-Zinapécuaro km 9.1. 58800 Tarímbaro, Michoacán, México.

<sup>‡</sup> Autora responsable (bayuelo@umich.mx)

<sup>2</sup> Subdirección de Investigación y Desarrollo, Unipalma de los Llanos S.A. Hacienda Santa Bárbara. Vía Cumaral-Veracruz km 25. Depto. del Meta, Colombia.

<sup>3</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. Carretera México-Toluca km 36.5, La Marquesa. 52750 Ocoyoacac, Estado de México, México.

<sup>4</sup> Universidad de São Paulo, Centro de Energía Nuclear para la Agricultura. Av. Centenário 303. 13400-970 São Dimas, Piracicaba - SP, Brasil.

### RESUMEN

Los Andisoles se distinguen por su habilidad para retener fósforo (P), lo cual restringe la productividad agrícola. Se planteó la hipótesis que la disponibilidad de P en las diferentes formas extraídas secuencialmente, variaría de acuerdo al uso del suelo y su intercambio dependería de las características químicas del mismo. En este estudio, se usaron los métodos de extracción secuencial y dilución isotópica para evaluar el efecto del uso del suelo y la adición de fertilizante en las fracciones inorgánicas y orgánicas de P y su disponibilidad. Se incluyeron muestras de suelo de un sitio con una larga historia de fertilización y otro de una área adyacente de bosque nativo, al cual se les aplicó  $\text{KH}_2^{32}\text{PO}_4$ . El suelo se fraccionó secuencialmente después de un periodo de 49 días de incubación y se determinó la proporción (%) de  $^{32}\text{P}$  recuperado en cada fracción. En todas las fracciones se recuperó  $^{32}\text{P}$ , lo que demuestra la existencia de intercambio entre el  $^{32}\text{P}$  y P natural del suelo. Las reacciones de intercambio ocurrieron mayormente en las fracciones inorgánicas. Las fracciones de resina-Pi,  $\text{NaHCO}_3$ -Pi e  $\text{NaOH}_{0.1}$ -Pi aumentaron con la fertilización de P, siendo la fracción de  $\text{NaOH}_{0.1}$ -Pi, la mayor fuente del nutriente. El mayor incremento de  $^{32}\text{P}$  recuperado en la fracción de  $\text{NaOH}_{0.1}$ -Pi, indica que el P añadido y transformado en esta fracción es altamente intercambiable y contribuye con la fertilidad de este suelo. Las fracciones recalcitrantes presentaron poco P intercambiable. En contraste, en el suelo de bosque sin fertilizar, más del 20% del  $^{32}\text{P}$

se recuperó en las fracciones de Bic-Po y  $\text{NaOH}$ -Po, 49 días después de que se añadió el radiotrazador. La transformación de las fracciones de P fue dependiente del tipo de suelo y la adición de P. El P aplicado permaneció, preferiblemente, en la forma que puede ser intercambiable con la solución del suelo y, por consiguiente, puede estar disponible para la planta.

**Palabras clave:** *fraccionamiento de Hedley, radiotrazador, intercambio isotópico, fertilidad del suelo.*

### SUMMARY

Andisols are distinguished by a high phosphorus (P) adsorption capacity, which is a restrictive factor for plant growth. This study, it was hypothesized that the availability of P in the different forms extracted sequentially, would vary according to the land use, and its exchange would depend on its chemical characteristics. For this purpose, sequential extraction and isotopic dilution techniques were utilized to measure the effect of land use systems and corresponding P fertilizer inputs on size of inorganic and organic P forms and their lability. An Andisol sample from a field site with a long history of P amendments and another sample from a contiguous forested area under natural vegetation were treated with applied  $\text{KH}_2^{32}\text{PO}_4$ . The soil samples were sequentially extracted for P fractions after 49 days (d) of incubation. Recovery of  $^{32}\text{P}$  in each P form was evaluated. The recovery of  $^{32}\text{P}$  in all soil

#### Cita recomendada:

Bayuelo Jiménez, J. S., I. Ochoa, E. Cruz Torres y T. Muraoka. 2019. Efecto del uso del suelo en las formas y disponibilidad de fósforo de un Andisol de la Meseta P'urhépecha, Michoacán. *Terra Latinoamericana* 37: 35-44.

DOI: <https://doi.org/10.28940/tl.v37i1.367>

Recibido: enero de 2018.

Aceptado: octubre de 2018.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 37: 35-44.

P fractions exhibited that  $^{32}\text{P}$  had undergone exchange with the native P. The exchange reaction occurred mainly in the Pi fractions. Resin-Pi, Bic-Pi and NaOH-Pi were increased by P fertilization, with the greater level occurring for NaOH-Pi. The highest increase of the  $^{32}\text{P}$  recovered in the  $\text{NaOH}_{0.1}$ -Pi fraction of the P-fertilized Andisol shows that the added P changed into this form stays highly exchangeable and contributes P fertility to this soil type. The recalcitrant inorganic fractions contained almost no exchangeable P. In contrast, in native soil with no P input, more than 20% of the  $^{32}\text{P}$  was recovered in Bic-Po and NaOH-Po forms 49 d after the labeled P was added. The change in soil P fraction was associated with soil type and P addition. Nonetheless, the applied P persisting in the fraction can be exchangeable with solution P and, hence, can be plant-available.

**Index words:** Hedley fractionation, radioisotopic tracer, isotopic exchange, soil fertility.

## INTRODUCCIÓN

Los Andisoles son los suelos prevalecientes en la Meseta P'urhépecha, Michoacán (Alcalá *et al.*, 2001). Estos suelos presentan una reducida disponibilidad de fósforo (P) y una acuciante retención de fosfatos, debida a la alta composición de materiales amorfos, como la imogolita, ferrihidrita, alófano y complejos órgano minerales de aluminio (Al) y hierro (Fe) (Dahlgren *et al.*, 2004; Soil Survey Staff, 2006), que limitan el crecimiento vegetal.

En esta región, el uso potencial de los suelos de Ando es de bosque, pero una vasta superficie se ha transformado hacia el uso agrícola, principalmente para el cultivo de maíz y aguacate (Sánchez *et al.*, 2009; Bravo-Espinoza *et al.*, 2014; Orozco-Ramírez y Astier, 2017). El cambio de uso del suelo puede alterar las propiedades físicas, químicas y biológicas y, por tanto, su fertilidad y capacidad productiva (Maranguit *et al.*, 2014). Los factores que alteran la distribución y disponibilidad de P en el suelo, incluyen las características inherentes del material parental, la disminución de la materia orgánica, la fuerte adsorción de  $\text{PO}_4^{3-}$  con  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$  (hidróxidos) y la baja o inadecuada aplicación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos (Bravo-Espinoza *et al.*, 2014; Galván-Tejada *et al.*, 2014; Maranguit *et al.*, 2017; Maharjan *et al.*, 2018).

En el suelo, el P está representado por diversas

fracciones que se definen por su relación con sus constituyentes minerales y orgánicos (Hedley *et al.*, 1982). Del contenido total de P en el suelo, sólo una pequeña fracción está en forma soluble ( $10^{-1}\%$ ) (Kruse *et al.*, 2015) y disponible para el crecimiento del cultivo; esta fracción está en equilibrio con la forma lábil que constituye los fosfatos adsorbidos a las arcillas y el P orgánico de fácil mineralización. El resto del P del suelo se encuentra en fracciones insolubles como fosfatos de hierro ( $\text{Fe}^{3+}$ ), aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ) y calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y fosfatos inmovilizado en las arcillas o adsorbidos en el humus (Nanzzyo, 2002; Dahlgren *et al.*, 2004; Kruse *et al.*, 2015).

La disponibilidad de P para el crecimiento vegetal, tanto en ecosistemas naturales como agrícolas, depende de la interacción de sus diferentes fracciones en el suelo y de su regulación mediante procesos físico-químicos (sorción-desorción) y biológicos (mineralización e inmovilización) (Dahlgren *et al.*, 2004; Crews y Brookes, 2014). Estos procesos pueden ser alterados por el manejo agronómico al que el suelo es expuesto. Por ejemplo, la conversión del bosque hacia sistemas agrícolas disminuye la cantidad de P lábil e incrementa la proporción de formas no disponibles (Galván-Tejada *et al.*, 2014). La erosión acelerada, debida a la deforestación y cambio de uso del suelo reduce la materia orgánica (Zheng *et al.*, 2005; Sánchez *et al.*, 2009) e impide que este importante substrato orgánico libere P lábil (Maharjan *et al.*, 2018). Por tanto, su fraccionamiento es útil para cuantificar el destino del P natural y aplicado a un sistema (Condrón y Newman 2011; Riskin *et al.*, 2013) y conocer las propiedades que controlan el contenido y comportamiento del P (Crews y Brookes, 2014; Galván-Tejada *et al.*, 2014).

Existen diversas metodologías para fraccionar el P del suelo (Hedley *et al.*, 1982; Cross y Schlesinger, 1995; Condrón y Newman 2011). En general, éstas consisten en la extracción secuencial de una muestra de suelo con diversas soluciones que digieren correspondientemente determinados componentes unidos con el P. Así, se han identificado diversas categorías como P lábil, P unido a sesquióxidos de Fe y Al, P unido a fosfatos de calcio, P unido a formas orgánicas y, por último, una fracción de P residual u ocluido que tiene muy baja disponibilidad para las plantas. En particular, la metodología propuesta por Hedley *et al.* (1982) ha mostrado una buena relación con las formas de P del suelo y el crecimiento de los cultivos (Crews, 1996; Buehler *et al.*, 2002; Redel *et al.*, 2016).

Las técnicas radio-isotópicas, por otra parte, han sido concluyentes en la cuantificación del ortofosfato que puede ser transferido de la fase sólida del suelo a la solución (Frossard *et al.*, 1993, Di *et al.*, 1997) y en la determinación del tiempo en que el P está disponible para el crecimiento de las plantas durante el ciclo del cultivo (Frossard *et al.*, 1993). Con estas técnicas, es posible marcar el P del suelo, el fertilizante y los residuos de plantas antes de aplicar el esquema de fraccionamiento secuencial (Buehler *et al.*, 2002; Chen *et al.*, 2003; Vu *et al.*, 2010; Condrón y Newman, 2011). A pesar de la importancia de estos métodos, su uso en estudios de dinámica de P en el suelo en México, es limitado.

En este estudio, se usaron los métodos de extracción secuencial y dilución isotópica para evaluar el efecto del uso del suelo (bosque y cultivado) y la adición de fertilizante fosfatado en las fracciones de P y su labilidad en un Andisol de la Meseta Purhépecha. La hipótesis de trabajo señala que la disponibilidad de P en las diferentes formas extraídas secuencialmente, variará de acuerdo al uso del suelo y su intercambio dependerá de las características químicas del mismo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Propiedades del Suelo y Muestreo

El estudio se realizó en la Meseta Purhépecha, en la localidad de Cherán (19° 44' 15" N y 102° 04' 45" O), en el estado de Michoacán. El clima de esta región es templado sub-húmedo con lluvias en verano [C (w2) (w)]. La temperatura media anual es de 20 °C y la altura de 2140 m. El suelo es un Typic Hapludand (Soil Survey Staff, 1999) con una alta capacidad de intercambio catiónico (9.3-25 cmol kg<sup>-1</sup>), materia orgánica (1.1-8.6%) y baja saturación de bases (< 30%) (Alcalá *et al.*, 2001). De acuerdo a Alcalá *et al.* (2009), en esta región se presenta una alta retención de fosfatos (> 55%) debida a la alta proporción de alófono (13-26%), Al (1.6-6.4%), Fe (0.8-5.5%) y ferrihidrita (5.8-8.4%). En el sitio de estudio, se eligió un área de 5 ha, en la cual estaban ubicados dos lotes contiguos dedicados a un uso de suelo de bosque de pino-encino (suelo nativo) y otro a cultivo de maíz (suelo cultivado). En esta superficie, se realizó un muestreo representativo del suelo siguiendo un diseño de cuadrícula de 6×8 puntos a una distancia de 40 m. Las muestras obtenidas a una profundidad de 0-20 cm,

se mezclaron para conformar una muestra compuesta. Posteriormente, se secaron y tamizaron (< 2 mm) antes de la incubación y determinaciones de P. Se incluyeron los siguientes tratamientos: 1) Suelo nativo (Nativo -P); (2) Suelo nativo +P (Nativo +P); (3) Suelo cultivado (Cultivado -P); (4) Suelo cultivado +P (Cultivado +P). Para los tratamientos con P (Nativo +P y Cultivado +P), el P se adicionó como fosfato de amonio di-básico [NH<sub>4</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] en tasas equivalentes a 10 y 40 mg kg<sup>-1</sup> de fósforo. Para el tratamiento testigo, sólo se adicionó agua deionizada.

### Características Físico-Químicas del Suelo

El análisis del suelo se realizó conforme a los métodos de la Norma Mexicana (NOM-021-RECNAT, 2000). Se usó el método de Bouyoucos para analizar la textura del suelo. La densidad aparente se evaluó en muestras de 211 cm<sup>3</sup> deshidratadas a 105 °C hasta temperatura constante. El pH se midió de una suspensión de 1:2 agua: suelo. El aluminio intercambiable se extrajo con una solución 1.0 M de KCl y se determinó por titulación con 0.1 M de NaOH. La materia orgánica total se determinó por combustión (TOC-5050A Shimadzu). Las bases intercambiables y la capacidad de intercambio catiónico se determinaron por la técnica de acetato de amonio 1 N a pH 7. Los cationes (Ca, Mg, Na, K y Fe) se analizaron con un espectro de absorción atómica (SpectrAA 220 Varian). El P disponible (0.030 M NH<sub>4</sub>F, 0.1 M HCl) se determinó por el método de Bray y Kurtz (1945). En el Cuadro 1 se presentan las características físicas y químicas del suelo.

### Fraccionamiento Secuencial del Suelo Marcado con <sup>32</sup>P

Antes de realizar el fraccionamiento del suelo, las muestras se pre-incubaron en una cámara (25 °C y 65% humedad relativa) durante dos semanas en porciones de 100 g a 50% de su capacidad de campo. Las muestras pre-incubadas del suelo se marcaron con 1 mL de KH<sub>2</sub><sup>32</sup>P<sub>4</sub> (5.3 MBq en 50 g suelo). El suelo se fraccionó secuencialmente después de un periodo de 49 días de incubación de acuerdo al método propuesto por Hedley *et al.* (1982) y modificado por Condrón *et al.* (1985). En resumen, cada muestra de suelo (0.5 g) fue sujeta a una extracción secuencial, primeramente con resinas de intercambio aniónico (Resina-Pi) y después

**Cuadro 1. Propiedades físico-químicas (0-20 cm) del suelo de bosque y cultivado.**  
**Table 1. Physico-chemical properties (0-20 cm) of the forest and cultivated soil.**

| Sistema   | Textura       |      |         | MO <sup>†</sup> | pH  | CIC <sup>‡</sup> | Bases intercambiables              |     |      |      | Al <sup>§</sup> | Fe                              | P   |
|-----------|---------------|------|---------|-----------------|-----|------------------|------------------------------------|-----|------|------|-----------------|---------------------------------|-----|
|           | Arena         | Limo | Arcilla |                 |     |                  | Ca                                 | Mg  | K    | Na   |                 |                                 |     |
|           | ----- % ----- |      |         |                 |     |                  | ----- cmolc kg <sup>-1</sup> ----- |     |      |      |                 | ----- mg kg <sup>-1</sup> ----- |     |
| Bosque    | 72.2          | 16.0 | 11.8    | 2.9             | 6.1 | 12.5             | 8.4                                | 3.2 | 0.82 | 0.09 | 0.18            | 84.8                            | 2.1 |
| Cultivado | 60.1          | 21.6 | 18.3    | 1.8             | 6.0 | 9.6              | 6.5                                | 1.7 | 1.14 | 0.11 | 0.14            | 52.5                            | 5.5 |

<sup>†</sup>MO = materia orgánica; <sup>‡</sup>CIC = capacidad de intercambio catiónico; <sup>§</sup>Al = aluminio intercambiable.

<sup>†</sup>MO = organic matter; <sup>‡</sup>CIC = cation exchange capacity; <sup>§</sup>Al = exchangeable aluminum.

con NaHCO<sub>3</sub> 0.5M (Bic-Pi) para determinar la fracción lábil de P inorgánico; seguidamente se realizó la extracción con NaOH 1.0 M (NaOH<sub>0.1</sub>-Pi) y NaOH 5 M (NaOH<sub>0.5</sub>-Pi) para cuantificar el P unido a sesquióxidos Fe/Al amorfos y cristalinos (Hedley *et al.*, 1982) y una extracción con HCl 1M (HCl-Pi) para determinar el P unido al calcio. Por último, se determinó el P residual u ocluido mediante una digestión con una mezcla de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentrados. El P asociado a la fracción orgánica se analizó por la diferencia entre el P obtenido a partir de la digestión con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado de alícuotas de los extractos obtenidos NaHCO<sub>3</sub> 0.5 M, NaOH 1 M y NaOH 5 M, a la cual se le sustrajo la cantidad correspondiente al P lábil delimitado previamente con los mismos extractantes. La concentración de P de los extractos ácidos y alcalinos se determinó con el método de Murphy y Riley (1962) y Dick y Tabatabai (1977), respectivamente. Para separar la fase soluble de <sup>32</sup>Pi y <sup>32</sup>Po de los extractos de NaHCO<sub>3</sub> (Bic-Po) y NaOH (NaOH<sub>0.1</sub>-Po y NaOH<sub>0.5</sub>-Po), se usó molibdato de amonio disuelto en isobutanol (Jayachandran *et al.*, 1992). La radioactividad de cada fracción se determinó en un contador (Hidex 300 SL) usando líquido de centelleo (Packard Instagel Plus XF) en una relación 2:18 (extracto: líquido).

La actividad específica (AE) del suelo, se determinó como Radioactividad (R) (<sup>32</sup>P) por unidad de P (<sup>31</sup>P) (Bq mg<sup>-1</sup> P). La proporción de P (%) y la cantidad de P (mg kg<sup>-1</sup>) en cada fracción de P del suelo derivada de las dos fuentes de P adicionado, se calculó de acuerdo a la técnica de dilución isotópica descrita por Fardeau (1996).

$$P(\%) = 100 \left[ \frac{AE_{\text{fracción}}}{AE_{\text{P adicionado}}} \right] \quad (1)$$

donde: AE<sub>fracción</sub> y AE<sub>P adicionado</sub> corresponden a la AE (Bq mg<sup>-1</sup> P) de cada fracción y el P marcado que se adicionó al suelo, respectivamente.

## Análisis Estadístico

Los análisis se realizaron con base a un diseño de bloques completos al azar con tratamientos arreglados en parcelas divididas con tres repeticiones por tratamiento. Se utilizó el procedimiento GLM para el análisis estadístico de los datos obtenidos de las cantidades de <sup>31</sup>Pi en las diferentes fracciones del elemento y para cada uso de suelo y nivel de P aplicado. Los datos de porcentaje de <sup>32</sup>Pi recuperado en cada fracción se transformaron a base logarítmica para su posterior análisis estadístico. La separación de medias se realizó con Tukey con valores de  $P \leq 0.05$  para comparar las diferencias entre uso del suelo y tratamientos de P en cada fracción evaluada (SAS Institute, 2000). Se utilizó el análisis de correlación de Pearson ( $P \leq 0.05$ ) para relacionar las formas de P con las características químicas del suelo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Efecto del Uso de Suelo y Fertilización en las Fracciones de Fósforo

El tipo de uso del suelo y la aplicación de fertilizantes afectan las propiedades físicas y químicas del mismo (Maranguit *et al.*, 2014). En este estudio, se observó que el suelo cultivado (cultivado-P) presentó un incremento en la saturación de bases (K<sup>+</sup>) y un decremento en la concentración de Fe<sup>2+</sup>, en comparación al de bosque (Bosque -P) (Cuadro 1). La disponibilidad de P en la solución, por consiguiente, aumentó con la fertilización (2.1 a 5.1 mg kg<sup>-1</sup>). A pesar de ello, la concentración de P disponible fue inferior al requerido para un adecuado crecimiento del cultivo (>15 mg kg<sup>-1</sup>) (Crews, 1996; Setiyono *et al.*, 2010).

En el Cuadro 2, se muestran los contenidos obtenidos de las diferentes fracciones de P. Los tratamientos



con P tuvieron un efecto significativo en las fracciones inorgánicas. Asimismo, las diferencias entre uso del suelo, tratamientos de P y las interacciones para todas las fracciones, excepto las orgánicas ( $\text{NaOH}_{0.1}\text{-Po}$  y  $\text{NaOH}_{0.5}\text{-Po}$ ) fueron significativas. El P total del suelo de bosque y cultivado incrementó significativamente por efecto de la dosis de P aplicado (662 a 747 y 695 a 828  $\text{mg kg}^{-1}$ , respectivamente) y éste fue mayor con respecto a los suelos no fertilizados (620 y 615  $\text{mg kg}^{-1}$ ). De acuerdo a Kruse *et al.* (2015), el P total en el suelo varía de  $10^1$  a  $10^3$   $\text{g kg}^{-1}$ , dependiendo del horizonte del suelo (sub-suelo < superficie), sustrato (arenoso < limoso), pedogénesis (antiguo < reciente), uso del suelo (bosque < pastizal < cultivado) y su intensidad de uso (extensivo < intensivo). Las concentraciones obtenidas en este estudio se encuentran en el rango reportado en Andisoles (490-2425  $\text{mg kg}^{-1}$ ) (Crews, 1996; Redel *et al.*, 2008; Meason *et al.*, 2009; Galván-Tejada *et al.*, 2014) y constituyen, a largo plazo, un suministro potencial de P.

El suelo cultivado (cultivado +P) presentó, en cambio, los valores más altos de P inorgánico lábil (Resina-Pi + Bic-Pi) (44 y 50  $\text{mg kg}^{-1}$ ) con respecto al de bosque (bosque +P) (29 y 35  $\text{mg kg}^{-1}$ , respectivamente). A pesar de que la fertilización promueve que la fracción

lábil se mantenga en rangos altos (Riskin *et al.*, 2013), es común que en Andisoles esta fracción sea menor debido a su alta sorción (Dahlgren *et al.*, 2004; Soil Survey Staff, 2006). En términos porcentuales, el P-lábil varió entre 5 a 6% con respecto al P total (Figura 1), lo cual coincide con valores obtenidos por otros autores (Bünemann *et al.*, 2004; Galván-Tejada *et al.*, 2014; Redel *et al.*, 2016).

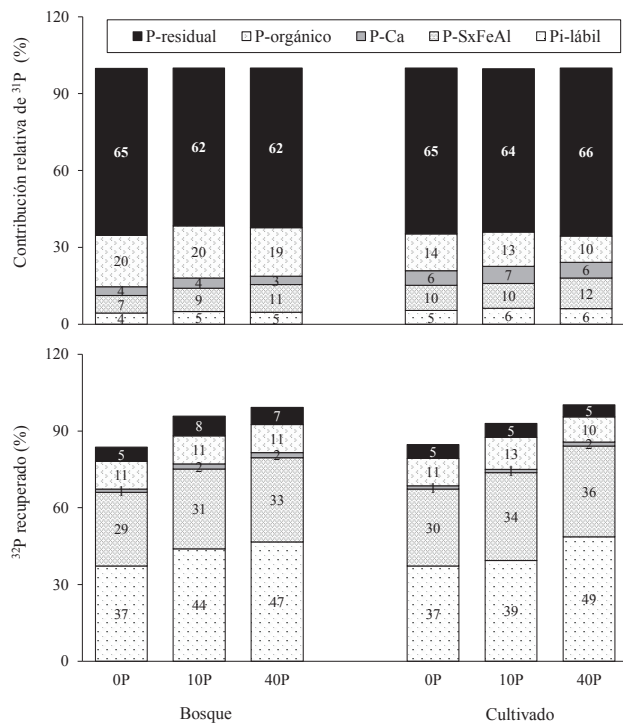
El fósforo de la fracción inorgánica de  $\text{NaOH}_{0.1}\text{-Pi}$  fue significativamente mayor en el suelo cultivado, de 60 a 99  $\text{mg kg}^{-1}$  (Cuadro 2) y constituyó de 10 a 12% de P total (Figura 1). Esta fracción es un componente importante en sistemas agrícolas (Crews, 1996) y forestales de México (Galván-Tejada *et al.*, 2014) pero su disponibilidad es reducida debido a que el P está químicamente adsorbido en el interior de fosfatos amorfos de Fe y Al (Dahlgren *et al.*, 2004). Según Kruse *et al.* (2015), el aumento de la concentración de óxidos de Fe y Al a pH menores de 5.5, intensifica la proporción de P adsorbido o fijado y reduce la eficiencia del fertilizante aplicado. Alcalá *et al.* (2009), mencionan que en Andisoles de la Meseta P'urhépecha, los aumentos de esta fracción están relacionados linealmente con Al intercambiable y Fe amorfos. En nuestro estudio, observamos que el Al ( $r=0.53$ ;  $P<0.01$ ) se correlacionó

**Cuadro 2. Fracciones de fósforo (P) obtenidas en un Andisol de la Meseta P'urhépecha con diferente uso de suelo y fósforo adicionado.**  
**Table 2. Phosphorus (P) fractions obtained in an Andisol of the Meseta P'urhépecha with different land use and added phosphorus.**

| Tratamientos                    |     | Resina | Bicarbonato |        | $\text{NaOH}_{0.1}$ |        | HCl    | $\text{NaOH}_{0.5}$ |        | Residual | Total   |
|---------------------------------|-----|--------|-------------|--------|---------------------|--------|--------|---------------------|--------|----------|---------|
|                                 |     | Pi     | Pi          | Po     | Pi                  | Po     | Pi     | Pi                  | Po     | Pi       | P       |
| ----- $\text{mg kg}^{-1}$ ----- |     |        |             |        |                     |        |        |                     |        |          |         |
| Bosque                          | 0P  | 3.7 b  | 28.2 ab     | 16.1 a | 42.1 c              | 77.6 a | 21.8 a | 83.5 c              | 30.0 b | 319.5 a  | 618.5 c |
| Bosque                          | 10P | 4.7 a  | 24.2 b      | 18.8 a | 59.8 b              | 77.0 a | 26.6 a | 101.0 b             | 38.5 a | 307.3 a  | 661.8 b |
| Bosque                          | 40P | 3.8 b  | 31.3 a      | 21.4 a | 80.6 a              | 78.0 a | 24.1 a | 119.5 a             | 42.8 a | 315.5 a  | 747.1 a |
| Cultivado                       | 0P  | 5.1 b  | 28.3 b      | 23.3 a | 60.1 c              | 31.8 a | 35.1 b | 58.2 c              | 33.0 a | 339.5 c  | 614.5 c |
| Cultivado                       | 10P | 7.6 a  | 36.2 a      | 15.6 b | 67.3 b              | 42.4 a | 45.5 a | 69.9 b              | 30.8 a | 373.1 b  | 688.4 b |
| Cultivado                       | 40P | 7.9 a  | 42.5 a      | 15.2 b | 99.1 a              | 35.0 a | 50.7 a | 80.6 a              | 29.5 a | 462.0 a  | 821.8 a |
| ANOVA                           |     |        |             |        |                     |        |        |                     |        |          |         |
| Suelo (S)                       |     | ***    | ***         | NS     | ***                 | ***    | ***    | ***                 | NS     | ***      | ***     |
| Fósforo (P)                     |     | ***    | **          | *      | ***                 | NS     | ***    | ***                 | **     | **       | ***     |
| S × P                           |     | ***    | *           | *      | ***                 | NS     | ***    | *                   | NS     | ***      | **      |

Letras en la misma columna indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). NS = no significativo. \* Significativo a  $P \leq 0.05$ , \*\*  $P \leq 0.01$ , \*\*\*  $P \leq 0.001$ . ANOVA para uso de suelo, nivel de P aplicado e interacción.

Letters in the same column indicate significant differences according to the Tukey test ( $P \leq 0.05$ ). NS = not significant. \* Significant to  $P \leq 0.05$ , \*\*  $P \leq 0.01$ , \*\*\*  $P \leq 0.001$ . Use ANOVA for soil, applied P level and interaction.



**Figura 1. Contribución relativa de las formas de  $^{31}\text{P}$  con respecto al P total y porcentaje de  $^{32}\text{P}$  recuperado: Pi-lábil (Resina + Bicarbonato), P-SxAlFe ( $\text{NaOH}_{0.1}$ ); P-Ca (HCl); P-orgánico (Bicarbonato +  $\text{NaOH}_{0.1}$  +  $\text{NaOH}_{0.5}$ ) y P-ocluído (P-residual +  $\text{NaOH}_{0.5}$ ) en un Typic Haplaund con diferente uso del suelo y P adicionado (0, 10 y 40  $\text{mg kg}^{-1}$ ).**

**Figure 1. Relative contribution of the  $^{31}\text{P}$  forms with respect to the total P and percentage of  $^{32}\text{P}$  recovered: Pi-labile (Resin + Bicarbonate), P-SxAlFe ( $\text{NaOH}_{0.1}$ ); P-Ca (HCl); P-organic (Bicarbonate +  $\text{NaOH}_{0.1}$  +  $\text{NaOH}_{0.5}$ ) and P-occluded (P-residual +  $\text{NaOH}_{0.5}$ ) in a Typic Haplaund with different soil use and added P (0, 10 and 40  $\text{mg kg}^{-1}$ ).**

negativamente con el  $\text{NaOH}_{0.1}$ -Pi (Cuadro 3). Esta correlación es atribuida al aumento de la actividad del Al intercambiable.

El P de la fracción HCl del suelo de bosque fue muy bajo, variando de 22 a 27  $\text{mg kg}^{-1}$ . Los mayores contenidos hallados correspondieron al suelo cultivado, de 35 a 51  $\text{mg kg}^{-1}$ , probablemente debido a la mayor cantidad de fosfatos primarios en el suelo (Shoji *et al.*, 1993). El HCl-Pi, correspondiente a la fracción de Pi más estable en minerales primarios de baja solubilidad como la apatita, fue mínimo ( $< 2\%$ ). Esto explica la pobre extracción con 1 M HCl y la incapacidad del ácido para disolver los fluorofosfatos de Ca. La relación negativa entre el contenido de Ca y la fracción de HCl ( $r = 0.55$ ;  $P < 0.01$ ) corroboran este hecho.

De todas las fracciones inorgánicas de P, el Pi-residual alcanzó los valores más elevados en el suelo cultivado con 339  $\text{mg kg}^{-1}$  seguido del suelo de bosque, con 320  $\text{mg kg}^{-1}$ . La fracción Pi-residual menos soluble presentó los contenidos más altos con la adición de P (462  $\text{mg kg}^{-1}$ ). Estos valores concuerdan con los de Velásquez *et al.* (2016) quienes hallaron, en los suelos con mayor grado de meteorización (Andisoles) fracciones más insolubles unidas a arcillas y sesquióxidos. El Pi-residual es, según Dahlgren *et al.* (2004), el reservorio interno de Pi ligado al  $\text{Fe}^{2+}$ . El Pi-residual representó de 63 a 65% del P total, lo cual refleja la menor disponibilidad y el aumento de formas recalcitrantes y de difícil transformación (Hedley *et al.* 1982). Los resultados de este estudio confirmaron que relación entre el contenido de  $\text{Fe}^{2+}$  ( $r = 0.93$ ;  $P < 0.001$ ) y el P residual del suelo es negativa, lo que demuestra la alta fijación de P debido a la presencia mineral de  $\text{Fe}^{2+}$ .

Como se esperaba, el suelo de bosque presentó el mayor contenido de P orgánico en comparación al cultivado y éste no varió con la adición de P (Cuadro 2). Particularmente, las formas de  $\text{NaOH}_{0.1}$ -Po, resultaron de mayor importancia en el suelo de bosque, en promedio 77  $\text{mg kg}^{-1}$ . La participación del P-orgánico (Bic-Po,  $\text{NaOH}_{0.1}$ -Po y  $\text{NaOH}_{0.5}$ -Po) con respecto al P-total, en términos porcentuales (Figura 1) correspondió a 21%. De acuerdo a Beck y Sánchez (1994), valores superiores del 20% del P-total establecidos en la forma orgánica representan una importante reserva de P en el suelo (Beck y Sánchez, 1994). En el suelo con manejo agrícola, hubo una disminución significativa del P orgánico (29  $\text{mg kg}^{-1}$ ) por efecto de la aplicación de fertilizante (Cuadro 2). Este representó el 14% del P total (Figura 1). Las diferencias en esta fracción probablemente estén relacionadas con la historia de fertilización de este suelo; al parecer por una reducción de la materia orgánica (Cuadro 1) en paralelo con un incremento en la mineralización del P orgánico (Velásquez *et al.*, 2016; Maranguit *et al.*, 2017). Una menor cantidad de residuos depositados en la superficie puede disminuir el contenido de materia orgánica (Bravo-Espinoza *et al.*, 2014; Maharjan *et al.*, 2018) y la capacidad del suelo para retener las fracciones de  $\text{NaOH}$ -Po (Zamuner *et al.*, 2008). El mayor contenido de P orgánico determina un aumento de las formas de mayor asimilabilidad (Bic-Po y  $\text{NaOH}$ -Po), que por posterior mineralización se transformarían en Bic-Pi (Cross y Schelesinger, 1995; Guppy *et al.*, 2005).

**Cuadro 3. Recuperación de  $^{32}\text{P}$  (%) del total adicionado (0, 10 y 40 mg kg<sup>-1</sup>) en cada forma de fósforo (P) de un Andisol de la Meseta P'urhépecha.****Table 3. Recovery of  $^{32}\text{P}$  (%) of the total added (0, 10 and 40 mg kg<sup>-1</sup>) in each form phosphorus (P) of an Andisol from the Meseta P'urhépecha.**

| Tratamientos |     | Resina | Bicarbonato |       | NaOH <sub>0.1</sub> |       | HCl   | NaOH <sub>0.5</sub> |       | Residual |
|--------------|-----|--------|-------------|-------|---------------------|-------|-------|---------------------|-------|----------|
|              |     | Pi     | Pi          | Po    | Pi                  | Po    | Pi    | Pi                  | Po    | Pi       |
| Bosque       | 0P  | 23.6 c | 13.6 b      | 4.9 a | 28.8 c              | 4.3 a | 1.3 b | 3.5 c               | 1.3 b | 2.0 a    |
| Bosque       | 10P | 27.4 b | 16.5 a      | 6.4 a | 31.2 b              | 3.4 b | 1.6 a | 5.5 b               | 1.6 a | 2.1 a    |
| Bosque       | 40P | 30.1 a | 17.5 a      | 5.9 a | 35.0 a              | 3.2 b | 2.1 a | 4.7 a               | 1.8 a | 2.0 a    |
| Cultivado    | 0P  | 23.4 b | 13.9 b      | 3.3 b | 30.1 b              | 5.9 a | 1.3 b | 3.7 b               | 1.6 b | 1.4 b    |
| Cultivado    | 10P | 24.5 b | 14.9 b      | 5.6 a | 39.4 b              | 5.4 a | 1.2 b | 4.0 b               | 1.8 a | 1.5 b    |
| Cultivado    | 40P | 30.4 a | 18.2 a      | 3.8 a | 39.5 a              | 4.9 a | 1.6 a | 3.2 a               | 1.2 a | 1.9 a    |
| ANOVA        |     |        |             |       |                     |       |       |                     |       |          |
| Suelo (S)    |     | **     | NS          | **    | NS                  | ***   | ***   | ***                 | **    | ***      |
| Fósforo (P)  |     | ***    | ***         | NS    | ***                 | *     | ***   | ***                 | **    | *        |
| S × P        |     | *      | **          | NS    | *                   | *     | *     | ***                 | **    | *        |

Letras en la misma columna indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). NS = no significativo. \* Significativo a  $P \leq 0.05$ , \*\*  $P \leq 0.01$ , \*\*\*  $P \leq 0.001$ . ANOVA para uso de suelo, nivel de P aplicado e interacción.

Letters in the same column indicate significant differences according to the Tukey test ( $P \leq 0.05$ ). NS = not significant. \* Significant to  $P \leq 0.05$ , \*\*  $P \leq 0.01$ , \*\*\*  $P \leq 0.001$ . Use ANOVA for soil, applied P level and interaction.

Meason *et al.* (2009) mencionan que en Andisoles, los altos contenidos de materia orgánica pueden encubrir los sitios de sorción de P relacionados a Fe y Al, y que éstos pueden ser una fuente importante para el P-lábil. En este estudio, observamos que hubo una correlación positiva ( $P \leq 0.01$ ) entre la materia orgánica y las diferentes formas de P orgánico del suelo (Bic-Po;  $r = 0.55$  y NaOH<sub>0.1</sub>-Po;  $r = 0.68$ ). Es posible, que estas fracciones hayan contribuido con el incremento de la fracción inorgánica lábil (Cuadro 2).

### La Distribución de $^{32}\text{P}$ entre las Formas de Fósforo

La técnica de dilución isotópica demostró que el  $^{32}\text{P}$  se intercambiaba rápidamente con las fracciones inorgánicas de P en la resina y, progresivamente, con las formas menos lábiles de Bic-Pi e NaOH<sub>0.1</sub>-Pi (Cuadro 3). Estas fracciones, a su vez, aumentaron con la adición de P, siendo la fracción de NaOH<sub>0.1</sub>-Pi, la mayor fuente del nutriente. En la fracción lábil de ambos suelos (Resina-Pi + Bic-Pi) se recuperó el 37% de P (Cuadro 3; Figura 1) y este porcentaje aumentó a 47% con la adición de fertilizante. Asimismo, la cantidad de  $^{32}\text{P}$  extraído en la fracción inorgánica de NaOH<sub>0.1</sub>-P fue alta (36%). En las fracciones inorgánicas (HCl-Pi y residual), por el contrario, sólo se recuperó una pequeña cantidad de  $^{32}\text{P}$  ( $< 2\%$ ) (Figura 1).

En los Andisoles de esta región, las fracciones de resina-Pi + Bic-Pi y NaOH<sub>0.1</sub>-Pi, constituyen importantes reservorios de P en el suelo. Nuestros resultados son consistentes con los obtenidos en Oxisoles (Buhler *et al.*, 2002), Vertisoles y Acrisoles (Vu *et al.*, 2010). Estos estudios demostraron que el  $^{32}\text{P}$  se intercambia rápidamente con la fracción de Pi de resina, y progresivamente en formas moderadamente lábiles (NaHCO<sub>3</sub> y NaOH<sub>0.1</sub>-P). La fracción inorgánica de HCl y residual, por el contrario, estuvo pobremente involucrada en los procesos de intercambio con  $^{32}\text{P}$ , ya que esta forma corresponde al P que está fuertemente adsorbido en la superficie de apatitas y que no está disponible para la planta (Shoji *et al.*, 1993). La recuperación de  $^{32}\text{P}$  en la fracción orgánica (21%) del suelo de bosque fue significativa y demostró que estas formas contribuyen notoriamente en la dinámica de P en ecosistemas naturales. Rodrigues *et al.* (2015) mencionan que en suelos tropicales, el mantenimiento de las formas orgánicas de P es un acervo crucial para el funcionamiento y productividad del suelo ya que éste es menos susceptible a las reacciones de sorción.

En general, en los suelos cultivados y fertilizados, ocurrió un mayor intercambio isotópico entre las formas inorgánicas lábiles (resina y bicarbonato) y moderadamente lábiles (NaOH<sub>0.1</sub>-P), resaltando la importancia de este acervo como P potencialmente

disponible para la planta. Las fracciones orgánicas, al contrario, parecen ser más importantes en suelos que aún no han sido fertilizados. Similares resultados fueron reportados por Oberson *et al.* (2001) y Briceño *et al.* (2004).

## CONCLUSIONES

- El uso del suelo afectó las formas y distribución del fósforo (P). El P derivado del suelo cultivado (con historia de fertilización) y de bosque se distribuyó entre todas las fracciones inorgánicas y orgánicas pero su proporción dependió de las características del mismo. El Pi estuvo representado mayormente por formas químicas estables (NaOH-Pi) y relativamente insolubles (HCl-Pi y Residual-Pi). El P adicionado al suelo se acumuló mayormente en las formas inorgánicas lábiles (Resina-Pi y Bic-Pi) y de moderada labilidad ( $\text{NaOH}_{0.1}$ -Pi), que están relativamente accesibles para los cultivos. Por el contrario, el P orgánico lábil (Bic-Po) y moderadamente lábil (NaOH-Po) disminuyó por el cambio de uso del suelo y la reducción de la materia orgánica.

- Con el uso de  $^{32}\text{P}$  se confirmó que existe un rápido intercambio entre las fracciones lábiles y el  $^{31}\text{P}$  adsorbido en la superficie del suelo (Resina-Pi y  $\text{NaHCO}_3$ -Pi) y las fracciones menos lábiles ( $\text{NaOH}_{0.1}$ -Pi). El  $^{32}\text{P}$  se distribuyó en todas las fracciones inorgánicas, sugiriendo que todas las fracciones sufren, directa o indirectamente, un intercambio con  $^{32}\text{P}$ . Sin embargo, la recuperación de  $^{32}\text{P}$  dependió de la historia de fertilización y las características físico-químicas del suelo. La alta proporción de  $^{32}\text{P}$  recuperado en la fracción de NaOH-Pi sugiere que esta fracción es de gran importancia en la fertilidad de Andisoles cultivados. En el suelo de bosque en donde no se aplicó fertilizante, por el contrario, las fracciones orgánicas fueron más importantes (21%) en mediar la disponibilidad de P. Las técnicas de fraccionamiento secuencial y radioisotópica fueron concluyentes en la caracterización de las formas y cuantificación del ortofosfato que puede ser transferido de la fase sólida del suelo a la solución. Esta información es de especial relevancia para ampliar el conocimiento sobre el impacto del cambio del uso del suelo sobre este recurso natural.

## RECONOCIMIENTOS

Al Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA/FAO), MEX/50/30/2014-2016 y la Coordinación de Investigación Científica, UMSNH 6.11/2016-2017.

## LITERATURA CITADA

- Alcalá, M., C. Ortiz y M. C. Gutiérrez. 2001. Clasificación de los suelos de la Meseta Tarasca, Michoacán. *Terra* 19: 227-239.
- Alcalá, M., C. Hidalgo Moreno y M. C. Gutiérrez C. 2009. Mineralogía y retención de fosfatos en Andisoles. *Terra Latinoamericana* 27: 275-286.
- Beck, M. A. and P. A. Sánchez. 1994. Soil phosphorus fractions dynamics during 18 years of cultivation on a typical Paleudolt. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1424-1431.
- Bravo-Espinosa, M., M. E. Mendoza, T. Carlón Allende, L. Medina, J. T. Sáenz-Reyes, and R. Páez. 2014. Effects of converting forest to avocado orchards on topsoil properties in the trans-Mexican volcanic system, Mexico. *Land Degrad. Dev.* 29: 452-467.
- Briceño, M., M. Escudey, G. Galingo, D. Borchardt, and A. Chang. 2004. Characterization of chemical phosphorus forms in volcanic soil using  $^{31}\text{P}$ -NMR spectroscopy. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 35: 1323-1337. doi: 10.1081/CSS-120037549.
- Buehler, S., A. Oberson, I. M. Rao, D. K. Friesen, and E. Frossard. 2002. Sequential phosphorus extraction of a  $^{33}\text{P}$ -labeled Oxisol under contrasting agricultural systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 868-877. doi: 10.2136/sssaj2002.8680.
- Bünemann, E. K., F. Steinebrunner, P. C. Smithson, E. Frossard, and A. Oberson. 2004. Phosphorus dynamics in a highly weathered soil as revealed by isotopic labeling techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1645-1655. doi: 10.2136/sssaj2004.1645.
- Chen, C. R., S. Sinaj, L. M. Condron, E. Frossard, R. R. Sherlock, and M. R. Davis. 2003. Characterization of phosphorus availability in selected New Zealand grassland soils. *Nutr. Cycl. Agroecosyst* 65: 89-100.
- Condron, L. M. and S. Newman. 2011. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils. *J. Soils Sed.* 11: 830-840.
- Crews, T. E. 1996. The supply of phosphorus from native, inorganic phosphorus pools in continuously cultivated Mexican agroecosystems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 57: 197-208. doi: 10.1016/0167-8809(95)01013-0.
- Crews, T. E. and P. C. Brookes. 2014. Changes in soil phosphorus forms through time in perennial versus annual agroecosystems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 184: 168-181. doi: 10.1016/j.agee.2013.11.022.
- Cross, A. F. and W. H. Schlesinger. 1995. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma* 64: 197-214. doi: 10.1016/0016-7061(94)00023-4.



- Dahlgren, R. A., M. Saigusa, and F. C. Ugolini. 2004. The nature, properties and management of volcanic soils. *Adv. Agron.* 82: 113-182. doi: 10.1016/S0065-2113(03)82003-5.
- Di, H. J., L. M. Condron, and E. Frossard. 1997. Isotope techniques to study phosphorus cycling in agricultural and forest soils: A review. *Biol. Fertil. Soils* 24: 1-12.
- Dick, W. A. and M. A. Tabatabai. 1977. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. *J. Environ. Qual.* 6: 82-85. doi: 10.2134/jeq1977.00472425000600010018x.
- Fardeau, J. C. 1996. Dynamics of phosphate in soils. An isotopic outlook. *Fert. Res.* 45: 91-100. doi: 10.1007/BF00790658.
- Frossard, E., C. Feller, H. Tiessen, J. W. B. Stewart, J. C. Fardeau, and J. L. Morel. 1993. Can an isotopic method allow for the determination of the phosphate fixing capacity of soils? *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 24: 367-377. doi: 10.2134/jeq2000.00472425002900010003x.
- Galván-Tejada, N. C., V. Peña-Ramírez, L. Mora-Palomino, and C. Siebe. 2014. Soil P fractions in a volcanic soil chronosequence of Central Mexico and their relationship to foliar P in pine trees. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 177: 792-802. doi: 10.1002/jpln.201300653.
- Guppy, C. N., N. Menzies, P. W. Moody, and F. P. C. Blamey. 2005. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. *Aust. J. Soil Res.* 43: 89-202. doi: 10.1071/SR04049.
- Hedley, M. J., J. W. B. Stewart, and B. S. Chauhan. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 970-976. doi: 10.2136/sssaj1982.03615995004600050017x.
- Jayachandran, K., A. P. Schwab, and B. A. D. Hetrick. 1992. Partitioning dissolved inorganic and organic phosphorus using acidified molybdate and isobutanol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 762-765. doi: 10.2136/sssaj1992.03615995005600030014x.
- Kruse, J., M. Abraham, W. Amelung, C. Baum, R. Bol, O. Kühn, H. Lewandowski, H. Niederberger, Y. Oelmann, C. Rüger, J. Santner, M. Siebers, N. Siebers, M. Spohn, J. Vestegren, A. Vogts, and P. Leinweber. 2015. Innovative methods in soil phosphorus research: A review. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 178: 43-48.
- Maharjan, M., D. Maranguit, and Y. Kuzyakov. 2018. Phosphorus fractions in subtropical soils depending on land use. *Eur. J. Soil Biol.* 87: 17-24.
- Maranguit, D., T. Guillaume, and Y. Kuzyakov. 2014. Land-use affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils. *Catena* 149: 385-393. doi: 10.1016/j.catena.2016.10.010.
- Meason, D. F., T. W. Idol, J. B. Friday, and P. G. Scowcroft. 2009. Effects of fertilization on phosphorus pools in the volcanic soil of a managed tropical forest. *For. Ecol. Manage.* 258: 2199-2206. doi: 10.1016/j.foreco.2009.04.001.
- Murphy, J. and J. P. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27: 31-36. doi: 10.1016/S0003-2670(00)88444-5.
- Nanzyo, M. 2002. Unique properties of volcanic ash soils. *Global Environ. Res.* 6: 99-112.
- NOM-021-RECNAT-2000 (Norma Oficial Mexicana). 2002. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. SEMARNAT. México, D. F.
- Obersson, A., D. K. Friesen, I. M. Rao, S. Buhler, and E. Frossard. 2001. Phosphorus transformation in an Oxisol under contrasting agricultural systems: the role of the soil microbial biomass. *Plant Soil* 237: 197-210.
- Orozco-Ramírez, Q. and M. Astier. 2017. Socio-economic and environmental changes related to the maize richness in Mexico's central highlands. *Agri. Hum. Values.* 34: 377-391.
- Redel, Y., R. Rubio, R. Godoy, and F. Borie. 2008. Phosphorus fractions and phosphate activity in an Andisol under different forest ecosystems. *Geoderma* 145: 216-221. doi: 10.1016/j.geoderma.2008.03.007.
- Redel, Y., P. Cartes, R. Demanet, G. Velásquez, P. Poblete-Grant, R. Bol, and M. L. Mora. 2016. Assessment of phosphorus status influenced by Al and Fe compounds in volcanic grassland soils. *J. Soil Sci. Plant Nut.* 16: 490-506. doi: 10.4067/S0718-95162016005000041.
- Rodrigues, M., P. S. Pavinato, P. J. A. Withers, A. P. B. Teles, and W. F. B. Herrera. 2015. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. *Sci. Total Environ.* 542: 1050-1061. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.118>.
- Riskin, S. H., S. Porder, C. Neill, A. M. S. Figueira, C. Tubbesing, and N. Mahowald. 2013. The fate of phosphorus fertilizer in Amazon soya bean fields. *Philos. Trans. R. Soc. B. Biol. Sci.* 368: 20120154. doi: 10.1098/rstb.2012.0154.
- SAS Institute. 2000. SAS/SAT user's guide: statistics. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Sánchez C., S., A. Flores, I. A Cruz y A. Velázquez. 2009. Estado y transformación de los ecosistemas terrestres por causas humanas. pp. 75-129. In: CONABIO (ed.). Capital natural de México, vol. II, Estado de conservación y tendencias de cambio. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- Setiyono, T. D., D. T. Walkers, K. G. Cassman, C. Witt, and A. Dobermann. 2010. Estimating maize nutrient uptake requirements. *Field Crops Res.* 118: 158-168. doi: 10.1016/j.fcr.2010.05.006.
- Shoji, S., R. Dahlgren, and M. Nanzyo. 1993. Genesis of volcanic ash soils. pp. 37-67. In: S. Shoji, M. Nanzyo, and R. Dahlgren. (eds.). Volcanic ash soils genesis, properties and utilization. Elsevier. Amsterdam.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agriculture Handbook 436. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Washington, DC, USA.
- Velásquez, G., P. T. Ngo, C. Rumpel, M. Calabi-Floody, Y. Redel, B. L. Turner, L. M. Condron, and M. L. Mora. 2016. Chemical nature of residual phosphorus in Andisols. *Geoderma* 271: 27-31.
- Vu, D. T., C. Tang, and R. D. Armstrong. 2010. Transformations and availability of phosphorus in three contrasting soil types from native and farming systems: A study using fractionation and isotopic labeling techniques. *J. Soils Sediments.* 10: 18-29.

Zamuner, E. C., L. I. Picone, and H. E. Echeverria. 2008. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices. *Soil Tillage Res.* 99: 131-138.

Zheng, F., X. He, X. Gao, Ch. Zhang, and K. Tang. 2005. Effects of erosion patterns on nutrient loss following deforestation on the Loess Plateau of China. *Agr. Ecosyst. Environ.* 108: 85-97.