



UNIVERSIDAD DE CHILE – FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES Y BIOTECNOLOGÍA

**“META-ANÁLISIS Y BRECHAS DEL CONOCIMIENTO EN LA LITERATURA
CIENTÍFICA SOBRE EL CICLO DEL FÓSFORO EN SUELOS (1975-2020)”**

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de:

Química ambiental

Alejandra del Pilar Lobos González

Director del Seminario de Título: Dr. (c) Ángelo Neira Albornoz

Co-Directora del Seminario de Título: Dra. Julieta Orlando

Noviembre, 2021

Santiago – Chile

ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES Y BIOTECNOLOGÍA
FACULTAD DE CIENCIAS – UNIVERSIDAD DE CHILE



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Ciencias Ambientales y Biotecnología de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile, que el Seminario de Título, presentado por

Alejandra del Pilar Lobos González

“META-ANÁLISIS Y BRECHAS DEL CONOCIMIENTO EN LA LITERATURA CIENTÍFICA SOBRE EL CICLO DEL FÓSFORO EN SUELOS (1975-2020)”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Química Ambiental

Dr.(c) Ángelo Neira Albornoz
Director Seminario de Título

Dra. Julieta Orlando
Co-directora Seminario de Título

Comisión Revisora y Evaluadora

Dr. Carlos Manzano Davila
Presidente Comisión

Dra. Ana Valdés Durán
Evaluador/a

Santiago de Chile, noviembre 2021



Alejandra nació el 25 de mayo de 1996, un día lluvioso y frío, fue la segunda hija de Carlos Lobos y Ana González.

Desde su infancia ha vivido en Colina junto a sus padres y sus hermanos.

El 2014, a los 17 años, ingresó a la carrera de Química Ambiental en la Facultad de ciencias de la Universidad de Chile. Para ella, ingresar a la universidad fue un cambio muy drástico, no pudo adaptarse totalmente al ambiente de la Facultad, por lo que tuvo

dificultades tanto en el ámbito personal como en el académico.

El 2017, comenzó su unidad de investigación en laboratorio de Química Ecológica, lugar en donde se pudo adaptar bastante bien, por lo que extendió su tiempo en ese laboratorio, y tuvo la oportunidad de presentar un poster científico de su investigación en el Congreso ALAEQ, el año 2018. Seguido de esto, en el 2019 realizó una segunda unidad de investigación, esta vez en el laboratorio de Ecología & Genética. Estas experiencias le ayudaron a establecerse en el área ecológica.

Alejandra es amante del arte en todas sus formas de expresión, desde muy pequeña ha practicado danza, actuación, y modelaje. Debido a sus estudios ha dejado de lado estas actividades, pero a futuro espera llevar a la par su carrera laboral con su pasión por las formas de crear arte.

A todos los que creyeron en mí

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, por su amor infinito y preocupación, por confiar en mí incluso en los momentos más difíciles, por tenerme paciencia en el difícil camino de la educación superior, y por creer en mí incondicionalmente.

Agradezco a mis hermanos, por su paciencia y su empatía hacía mí, dando mi espacio para poder estudiar o hacer trabajos, ha sido algo muy valioso, y, además, los debates que he tenido con ellos sobre temas de la actualidad me ayudaron a tener más seguridad en mis propios conocimientos, y adentrarme a indagar los temas que no conocía.

Quiero hacer un agradecimiento especial al profesor Ángelo Neira, quien me guió a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscaba. Más aún, quiero agradecerle porque sus clases fueron las que me hicieron volver a amar la carrera. Su pasión por enseñar, y su amplio conocimiento del tema me hicieron entender y disfrutar cada una de sus clases, además de que, muchas de sus palabras me hicieron confiar en mis capacidades académicas, y seguir adelante.

A Mitza, que me ha ayudado bastante en todas las etapas de este proyecto, con sus conocimientos y sus consejos.

Además, agradezco a la profe Julieta Orlando, por darme la oportunidad de trabajar con ella en este proceso, su presencia en toda la fase de mi investigación fue muy importante. Sus palabras, sus recomendaciones han sido importantes para mí, y para lo que vendrá en mi futuro.

Agradezco a mi comisión evaluadora, que estuvo presente brindándome orientación, en especial al Dr. Carlos Manzano quién con sus comentarios y consejos durante las correcciones me ayudo a complementar este trabajo.

Finalmente, le agradezco al proyecto FONDECYT 1181510.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Ciclos biogeoquímicos de nutrientes en el suelo	1
1.2. Ciclo del P en el suelo.....	3
1.3. Relevancia socioambiental del P.....	7
1.4. Complejidad de los estudios de ciclo del P.....	9
1.5. Preguntas de investigación	11
1.6. Objetivos	11
1.6.1. Objetivo General.....	11
1.6.2. Objetivos Específicos	11
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
2.1. Revisión sistemática	12
2.2. Categorización de la información.....	14
2.3. Análisis de información y estado del arte	15
2.4. Detección y análisis de brechas de conocimiento.....	17
3. RESULTADOS	18
3.1. Conceptualización del ciclo del P en suelos	18
3.1.1. Definición propuesta para “reservorio”.....	18
3.1.2. Definición propuesta para “proceso”.....	20
3.1.3. Definición propuesta para “ciclo del P” en el suelo.....	21
3.2. Análisis de conceptos para los reservorios internos de P.....	23
3.2.1. Propuesta conceptual para los reservorios internos de P	23
3.2.2. Información detectada en literatura	28
3.2.3. Brechas de conocimiento detectadas para los reservorios de P	35
3.3. Frecuencia y análisis de información	36
3.3.1. Contextualización	36

3.3.2. Estudios agrícolas	39
3.3.3. Procesos.....	40
4. DISCUSIÓN	42
4.1. Evaluación de los criterios de selección de artículos y extracción de información	42
4.2. Análisis de la propuesta conceptual para reservorios internos	44
4.2.1. Alcances y limitaciones de la propuesta conceptual.....	44
4.2.2. Análisis de casos particulares	46
4.3. Análisis de categorías y brechas de conocimiento	48
4.3.1. Vinculación entre categorías	48
4.3.2. Tendencias detectadas.....	56
4.3.3. Sesgos probables	59
4.3.4. Vinculación entre brechas de conocimiento detectadas	62
4.4. Proyecciones	65
4.4.1. Limitaciones y sugerencias para futuras investigaciones	65
4.4.2. Aplicación de la propuesta conceptual en estudios futuros.....	68
5. CONCLUSIONES	75
6. BIBLIOGRAFÍA.....	77
ANEXO	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Reservorios metodológicos derivados del método de extracción secuencial de Hedley.	23
Tabla 2. Reservorios metodológicos derivados de distintos métodos de cuantificación de P.	24
Tabla 3. Reservorios de la categoría estructural encontrados en la literatura analizada del ciclo del P en suelos.	26
Tabla 4. Reservorios de la categoría mecánica encontrados en la literatura analizada del ciclo del P en suelos.	26
Tabla 5. Reservorios de la categoría analítica encontrados en la literatura analizada del ciclo del P en suelos.	27
Tabla 6. Reservorios de la categoría ecológico encontrados en la literatura analizada del ciclo del P en suelos.	27
Tabla 7. Frecuencia de información de los reservorios de P encontrados en literatura.	28
Tabla 8. Frecuencia de información de los reservorios de categoría metodológica, encontrados en la literatura de los estudios del ciclo del P en suelos.	29
Tabla 9. Frecuencia de información de los reservorios de categoría analítica encontrados en la literatura de los estudios del ciclo del P en suelos.	30
Tabla 10. Frecuencia de información de los reservorios de categoría ecológica encontrados en la literatura de los estudios del ciclo del P en suelos.	32
Tabla 11. Frecuencia de información de los reservorios con categoría estructural encontrados en la literatura de los estudios del ciclo del P en suelos.	33
Tabla 12. Frecuencia de información de los reservorios de categoría mecánica encontrados en la literatura de los estudios del ciclo del P en suelos.	34
Tabla 13. Frecuencia de información de la contextualización de los estudios del ciclo del P en suelos, encontrada en la literatura.	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación general del ciclo biogeoquímico de nutrientes en suelos.	2
Figura 2. Concentración relativa de los iones ortofosfato en función del pH de la solución suelo (adaptado de Brady & Weil, 1999).....	4
Figura 3. Ciclo biogeoquímico del P en el suelo, considerando los procesos geoquímicos y biológicos.....	6
Figura 4. Estructura y criterios de exclusión de la revisión sistemática.	12
Figura 5. Enfoques experimentales para el estudio del ciclo del P en el suelo.....	21
Figura 6. Ejemplo del tercer enfoque experimental usando implícitamente el primer (A) y segundo (B) enfoque para cuantificar P adsorbido.....	22
Figura 7. Frecuencia de información de los objetivos detectados en literatura. En verde: objetivos agrícolas. En azul: objetivos fundamentales.....	36
Figura 8. Representación gráfica de la información de los ecosistemas que se encontraron en los estudios del ciclo del P en suelos.	39
Figura 9. Información de los procesos encontrados en los estudios del ciclo del P en suelos.	41
Figura 10. Reservorios estructurales involucrados en el ciclo del P en suelos.	68
Figura 11. Reservorios metodológicos involucrados en el ciclo del P en suelos.....	69
Figura 12. Reservorios analíticos involucrados en el ciclo del P en suelos.	71
Figura 13. Reservorios mecanísticos involucrados en el ciclo del P en suelos.....	72
Figura 14. Reservorios ecológicos involucrados en el ciclo del P en suelos.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS

Pi:	Fósforo inorgánico
Po:	Fósforo orgánico
MO:	Materia orgánica
XANES:	Espectroscopía de absorción de rayos X en el borde cercano
HPLC:	Cromatografía líquida de alta presión
NMR:	Resonancia magnética nuclear
DNA:	Ácido desoxirribonucleico
RNA:	Ácido ribonucleico
ATP:	Adenosín trifosfato
ADP:	Adenosín difosfato
AMP:	Adenosín monofosfato

RESUMEN

En el suelo, el fósforo (P) se encuentra en formas orgánicas e inorgánicas y sólo una pequeña fracción está disponible para la biota. Su dinámica está regulada por diferentes procesos, que afectan a la cantidad de P que está disponible para su absorción por las plantas, microorganismos, y para el transporte a las aguas superficiales y subterráneas. En la literatura, el estudio del ciclo del P es parcelado, enfocado en los intereses específicos y afectado por los sesgos de conocimiento de cada investigador/a, además no existen criterios de unificación para describir procesos y reservorios dentro del ciclo.

El P toma un carácter socioambiental relevante al ser un nutriente esencial para los cultivos y la conservación de los ecosistemas. No obstante, el aumento de la producción agrícola ha conllevado a un suministro poco sostenible de este nutriente limitante, por lo que las innovaciones futuras en el manejo de este nutriente requieren de la comprensión del ciclo del P en el suelo, debido a que mayor información y consenso sobre estudios de este ciclo biogeoquímico favorecerían una adecuada toma de decisiones.

Para este estudio se realizó una revisión sistemática en la plataforma *Web of Science* (1975 a 2020), basada en las siguientes preguntas de investigación: ¿Cómo se estudia el ciclo del P en suelos? ¿Qué brechas de conocimiento existen en torno a dicho estudio? Con los resultados de la búsqueda se creó una matriz de información contextual (objetivos, ecosistemas estudiados, taxonomía de suelos, tipo de organismos y escala espacio-temporal), biogeoquímica (reservorios, procesos) y metodológica (cuantificación de P).

Se creó una propuesta conceptual que categoriza y unifica las definiciones de los reservorios detectados en la literatura, proponiéndose las siguientes categorías de reservorios internos: metodológico, mecanístico, estructural, ecológico y analítico. Luego se realizó un análisis cuantitativo derivado de la propuesta conceptual, con cálculos de soporte y de *lift* (relación de soportes). Se detectó que solo el 30% de los artículos estudiaron procesos, demostrando que se conoce poco sobre la dinámica del P en suelos. Esta información se relacionó estrechamente con el bajo porcentaje de reservorios mecanísticos (17%) en comparación con las demás categorías de reservorios. Además, se encontró que hay preferencia por el estudio de Agroecosistemas y Ecosistemas forestales, siendo solo el 22% estudios de otros ecosistemas.

Con este análisis, se detectó que las principales brechas de conocimiento entorno a los estudios del ciclo del P en suelos se relacionan con la falta de información y consenso.

Con toda esta información, se propusieron consideraciones para generar ciclos del P contextualizados a los objetivos de los autores, se dieron indicaciones sobre la falta de información actual para promover futuras investigaciones que resuelvan este vacío de conocimiento, y se generaron guías para detectar o evitar sesgos dentro de estos estudios.

ABSTRACT

In the soil, phosphorus (P) is found in organic and inorganic forms, and only a small fraction is available to the biota. Different processes regulate its dynamic, affecting the amount of P available for absorption by plants and microorganisms, and its transport to surface and groundwater. In the literature, the study of the P cycle is fragmented, focused on the specific interests and affected by individual knowledge bias of each researcher; in addition, there are no unifying criteria to describe processes and reservoirs within the cycle.

P takes a relevant socio-environmental character as it is an essential nutrient for crops and the conservation of ecosystems. However, the increase in agricultural production has led to an unsustainable supply of this limiting nutrient, so future innovations in the management of this nutrient require an understanding of the P cycle in the soil because more information and consensus on studies of this biogeochemical cycle would favor adequate decision-making.

For this study, a systematic review was carried out on the Web of Science database (1975 to 2020), based on the following research questions: How is the P cycle studied in soils? What knowledge gaps exist around this study? With the search findings, a matrix of contextual (objectives, studied ecosystems, soil taxonomy, type of organisms, and space-time scale), biogeochemical (reservoirs, processes), and methodological (quantification of P) information was created.

A conceptual proposal was created to categorize and unify the definitions of the reservoirs detected in the literature, proposing the following categories of internal reservoirs: methodological, mechanistic, structural, ecological, and analytical. Then, a quantitative analysis derived from the conceptual proposal was performed, with support

and lift calculations. Only 30% of the articles studied processes, demonstrating that little is known about the dynamics of P in soils. This information is closely related to the low percentage of mechanistic reservoirs (17%) compared to the other categories of reservoirs. In addition, it was found that there is a preference for studying agroecosystems and forest ecosystems, with only 22% being studies of other ecosystems.

With this analysis, it was detected that the main knowledge gaps of the P cycle studies in soils are related to the lack of information and consensus.

With all this information, considerations to generate P cycles contextualized to the authors' objectives were proposed, indications about the current lack of information were given to promote future research to resolve this knowledge gap, and guidelines to detect or avoid biases within these studies were generated.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Ciclos biogeoquímicos de nutrientes en el suelo

Los ciclos biogeoquímicos son representaciones de la dinámica de elementos químicos de interés biológico dentro de un ecosistema, mediante distintos compartimentos bióticos y abióticos relacionados por procesos de transformación (Enrich-Prast y col., 2019).

Los ciclos biogeoquímicos incluyen interacciones entre diferentes componentes del sistema terrestre, tales como la litósfera, atmósfera, hidrósfera y biósfera, evidenciando la interdependencia entre los componentes de los ecosistemas y promoviendo un enfoque sistémico de los procesos naturales (Esteve & Jaén 2013). En este sentido, cada componente es un sistema abierto que acumula e intercambia materia y energía con su entorno (Degioanni y col., 2008).

En particular, el componente suelo el cual es parte de la litósfera, es relevante para la biodiversidad, la preservación de ecosistemas y la alimentación de la población humana. Esto debido a que el suelo proporciona nutrientes para el crecimiento de las plantas, las cuales son esenciales para la nutrición animal y humana (Bezdicsek y col., 1996).

La formación del suelo es conducida por gradientes de propiedades químicas y físicas que se producen entre la atmósfera y la biósfera en interacción con rocas y minerales (Degioanni y col., 2008), existiendo una amplia variedad de ecosistemas terrestres donde los procesos biogeoquímicos son muy diversos por las características geológicas y biogeográficas (Enrich-Prast y col., 2019), complejizando el estudio de ciclos biogeoquímicos en este compartimento.

El estudio de estos ciclos biogeoquímicos en el suelo se basa en las transformaciones de los compuestos químicos inorgánicos a orgánicos, y viceversa, mediados por la síntesis y degradación de materia orgánica, dependiente de la actividad biológica (Enrich-Prast y col., 2019).

En la práctica, un ciclo biogeoquímico es representado a través de reservorios, que corresponden a formas específicas de elementos químicos contenidas en compartimentos dentro de un ecosistema, y a la interacción de estos reservorios a través del movimiento y conversión de estas formas de elementos químicos se les denomina procesos (Smith T. & Smith R. 2007). Debido a la interacción constante entre el suelo y su entorno, el estudio de los ciclos biogeoquímicos en el suelo debe considerar tanto los reservorios y procesos internos al suelo, como los reservorios y procesos externos, que puedan contribuir en él, tal y como se muestra en la Figura 1.

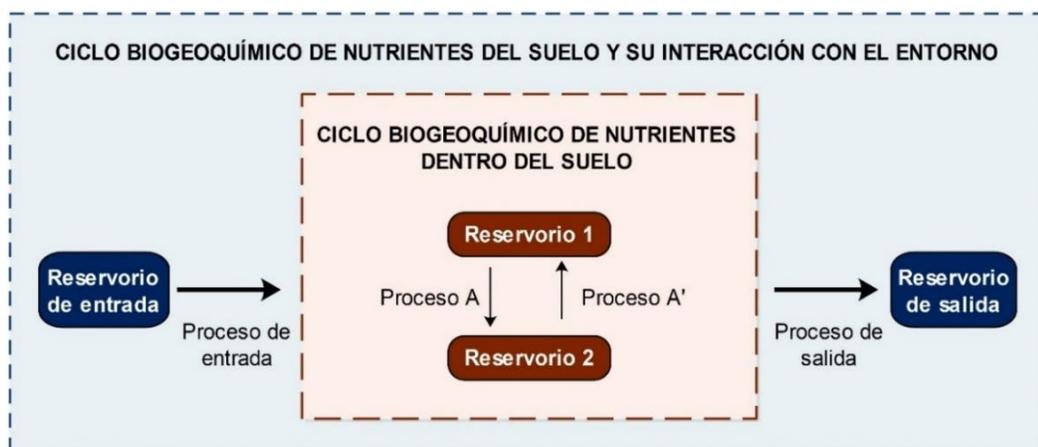


Figura 1. Representación general del ciclo biogeoquímico de nutrientes en suelos.

De entre todos los elementos químicos que están presentes en los ciclos biogeoquímicos del suelo, los más importantes son el nitrógeno (N) y el fósforo (P) (Gallardo y col., 2009), ambos considerados nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas y los microorganismos, cuya biodisponibilidad es uno de los principales

reguladores del funcionamiento de los ecosistemas y del mantenimiento de la biodiversidad (Enrich-Prast y col., 2019; Filippelli, 2008). Sin embargo, los ciclos biogeoquímicos de ambos nutrientes son diferentes, tanto en lo que se refiere a los procesos de entrada y salida de los ecosistemas como a los mecanismos de retención dentro de éstos (Gallardo y col., 2009).

A diferencia del N, el P no tiene fases gaseosas atmosféricas estables, por lo que los ecosistemas terrestres tienen que depender de la transferencia acuosa de este nutriente (Filippelli, 2008). Sin embargo, el P no posee facilidad para moverse en sistemas terrestres, en comparación con el N (Vitousek & Howarth 1991), esto debido a que hay una menor proporción de P lábil en el suelo, y este P es rápidamente retenido dentro de los ecosistemas terrestres por mecanismos biológicos (p.ej. absorción por plantas) y geoquímicos (p.ej. adsorción, dependiendo de la carga del suelo, y precipitación con hierro, aluminio, manganeso y calcio) (Wood y col., 1984).

1.2. Ciclo del P en el suelo

El P es un elemento esencial para la vida y se encuentra principalmente en suelos y sedimentos, procedente de la meteorización del lecho rocoso continental (Ruttenberg, 2003).

El P del suelo puede agruparse en dos formas principales: inorgánica y orgánica.

El P inorgánico (Pi) procede de (i) minerales primarios que derivan directamente del material parental degradado, (ii) minerales secundarios que se forman a través de la precipitación de P con Al, Fe y/o Ca, (iii) P adsorbido en las superficies de minerales de arcilla, oxihidróxidos de Fe y Al, o carbonatos y (iv) P ocluido, obstruido físicamente dentro de los minerales secundarios (Sims & Pierzynski 2005).

Por otro lado, el P orgánico (Po) se encuentra en dos grupos establecidos: (i) P obtenido de la actividad microbiana y raíces de plantas, por lo tanto, disponible biológicamente, tales como fosfatos de inositol, fosfolípidos, ácidos nucleicos, ácidos y sus derivados, y (ii) P estable y altamente resistente a la actividad microbiana, p.ej. P dentro de la fracción de ácido húmico (Stevenson, 1994). La biomasa microbiana es también una de las formas importante de Po del suelo (Turner y col., 2001).

Las formas inorgánicas y orgánicas del P se encuentran en equilibrio dinámico con el P soluble en la solución del suelo. El P en la solución suelo está presente principalmente como ortofosfatos primarios (PO_4^{3-}) o secundarios (HPO_4^{2-} , H_2PO_4^-), cuya especiación varía en función del pH del suelo (Sims & Pierzynski 2005). De acuerdo a la figura 2, en medio ácido predominan las formas H_3PO_4 y H_2PO_4^- , en tanto cuando el pH es superior a 7,2 predomina la forma de HPO_4^{2-} .

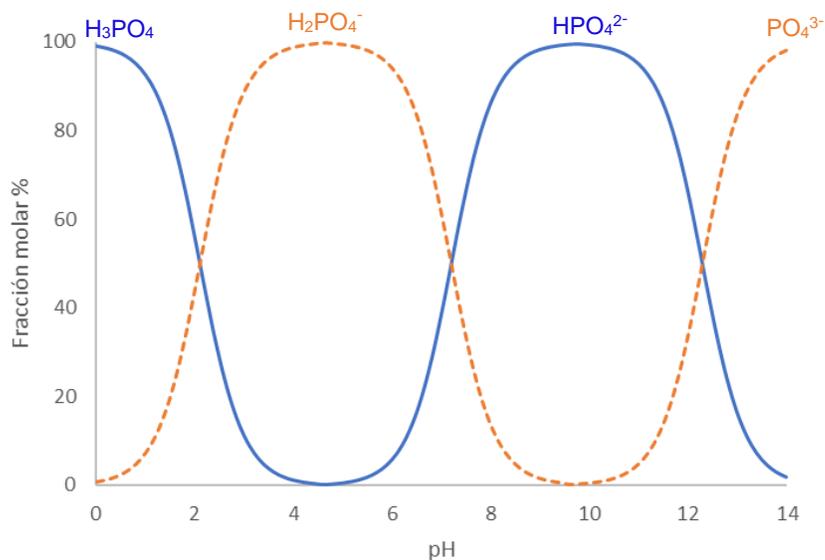


Figura 2. Concentración relativa de los iones ortofosfato en función del pH de la solución suelo (adaptado de Brady & Weil, 1999).

El P soluble representa una pequeña cantidad del P total de los sistemas terrestres. Esto debido a que solo el P soluble se encuentra biodisponible, siendo extraído por la alta demanda de las plantas, microorganismos, entre otros, por lo que debe ser

constantemente reabastecido (Pierzynski y col., 2005; Kaur y col., 2016). Además, se pueden generar complejos insolubles entre P y cationes o arcillas, reduciendo su disponibilidad hacia la biota (biodisponibilidad) (Hinsinger, 2001).

El P soluble se moviliza dentro de los suelos principalmente por difusión a través de los poros de la matriz. Esto es debido a que, a diferencia de otros elementos, las bajas concentraciones de P en la solución del suelo impiden un movimiento significativo por flujo másico (Sims & Pierzynski 2005).

Una de las principales fuentes de P soluble es el P mineral, solubilizado mediante meteorización química y biológica de minerales, siendo la apatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH}^-, \text{F}^-, \text{Cl}^-)_2$) el mineral de fósforo primario más abundante en las rocas de la corteza (Ruttenberg, 2003). La solubilización de la apatita genera una pérdida de Ca^{+2} por lixiviación o absorción vegetal, mientras que los complejos Al-P y Fe-P se vuelven más importantes (Ruttenberg, 2003). Además, los organismos pueden favorecer la solubilización del P mineral y desorción de P adsorbido utilizando ácidos orgánicos de bajo peso molecular derivados de la actividad biológica y enzimática, como fosfatasas, fitasas, entre otros (Frossard y col., 1995). El Pi solubilizado durante la meteorización y desorción es asimilado por organismos y puede reingresar al ciclo durante la mineralización biológica de la materia orgánica del suelo (Stewart & Tiessen 1987). Sin embargo, pueden existir pérdidas de P, principalmente por la erosión y la escorrentía superficial, mientras que no se producen pérdidas gaseosas de P y la lixiviación o la escorrentía subterránea de P dependen de cada caso y tipo de suelo (Andersson y col., 2015).

Por lo tanto, entre los principales procesos del ciclo del P, se encuentran la disolución/precipitación y la adsorción/desorción, que regulan la cantidad de P disponible para la biota (biodisponible), y la mineralización/inmovilización, donde por mediación

biológica se produce la conversión entre las formas de P inorgánicas y orgánicas (Sims & Pierzynski 2005).

Todos estos procesos afectan a la concentración de P en la solución y la fase sólida del suelo, por lo tanto, a la cantidad de P disponible para las plantas, los microorganismos y para el transporte a las aguas superficiales y subterráneas (Figura 3).

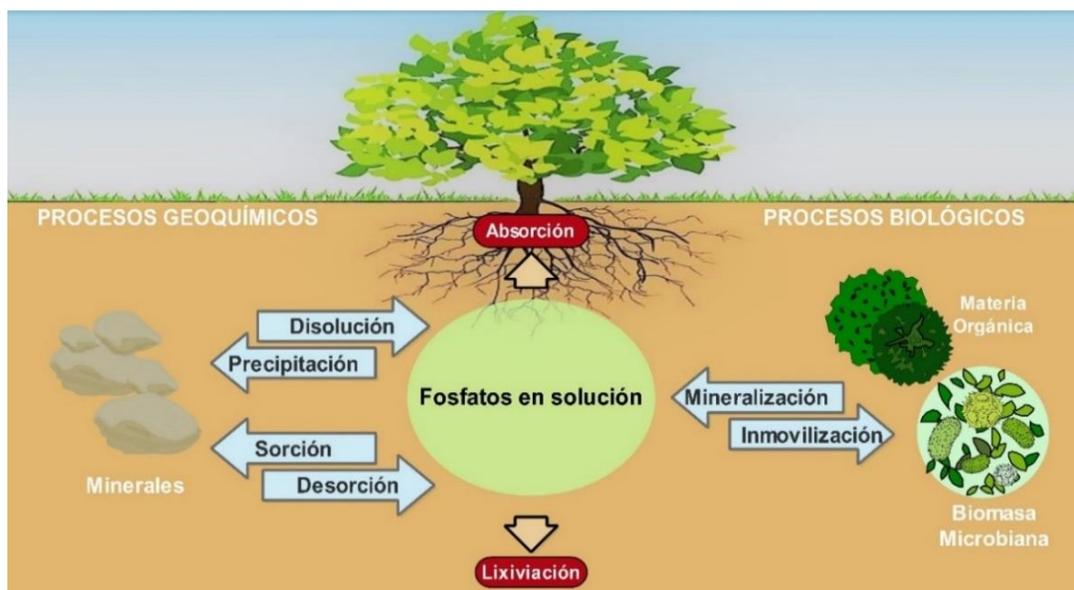


Figura 3. Ciclo biogeoquímico del P en el suelo, considerando los procesos geoquímicos y biológicos.

Estos procesos pueden clasificarse en dos grupos, según su escala temporal: geoquímicos y biológicos (Beck & Elsenbeer 1999). Los procesos geoquímicos regulan la distribución a largo plazo del P en los suelos, controlada por el material parental, por las propiedades pedogenéticas del suelo, y por el clima, que determinan la tasa general de meteorización e influyen en el equilibrio entre la pérdida y retención de P (Cross & Schlesinger 1995).

Los procesos biológicos regulan el movimiento y la distribución de formas lábiles de P, y el reciclaje del Po (Stewart & Tiessen 1987). Estos procesos están controlados

principalmente por la descomposición, inmovilización y mineralización bacteriana y fúngica, además de la absorción por plantas. Las bacterias, los hongos y las plantas incorporan el fosfato a la biomasa, convirtiéndolo en P_o , iniciando así el ciclo biológico. De forma adicional, el P_o se puede mineralizar, reincorporando P_i a la solución suelo (Cross & Schlesinger 1995; Schlesinger & Andrews 2000).

Los procesos biológicos y geoquímicos están en constante interacción, intercambiando la cantidad de P biodisponible con la cantidad de P retenido geoquímicamente (Olander & Vitousek 2004). Sin embargo, el P geoquímico procede de minerales que se han formado durante millones de años (Enrich-Prast y col., 2019), con cinética de disolución lenta (Sims & Pierzynski 2005), lo que hace al P no renovable y de disponibilidad finita a escala humana.

1.3. Relevancia socioambiental del P

El P es un nutriente limitante para el crecimiento y desarrollo de las plantas, ampliamente utilizado para la producción agrícola de alimentos e industria química, en donde los usos comunes incluyen fertilizantes, jabones, detergentes y agentes de preparación de superficies (Jeong y col., 2009). Estas actividades humanas alteran el equilibrio natural del ciclo del P, creando enormes flujos de nutrientes adicionales, eutrofización de los sistemas acuáticos y contaminación de los sistemas terrestres (Hoppe y col., 2016).

Existen diversos factores antropogénicos que influyen en las concentraciones de P geoquímico y soluble. Por ejemplo, el crecimiento de la población a nivel mundial ha significado un aumento en la producción de cultivos agrícolas, y con esto una dependencia de los suministros de P mineral, que no están distribuidos de manera uniforme, y un incremento en el uso del P_i como fertilizante. Entre las principales

contribuciones de P asociadas con la actividad humana, se tienen la fertilización, el uso de abonos de origen animal y vegetal, la adición de enmiendas del suelo como la cal o subproductos municipales e industriales (p.ej., biosólidos, compost) y asimilación de P desde los cultivos cosechados (Sims & Pierzynski 2005), que se encuentran relacionadas principalmente con la actividad agrícola, y forestal.

De estas fuentes de P exógeno, la fertilización es primordial en contextos agrícolas, ya que aumenta la biodisponibilidad de P para los cultivos, manteniendo niveles óptimos de P lábil. Sin embargo, el P también es susceptible de sufrir escorrentía, lixiviación y adsorberse en la fase sólida del suelo, dependiendo de las propiedades fisicoquímicas, biológicas, geológicas y climáticas de cada suelo. Por consiguiente, es necesario conocer el ciclo biogeoquímico del P en suelos locales para evitar la fertilización insuficiente o la sobrefertilización, que generan reducción progresiva de la calidad agrícola del suelo y aumento de P en aguas superficiales y subterráneas poco profundas, respectivamente (Whalen & Chang 2001). En este sentido, se han propuesto modelos conceptuales donde el impacto negativo del P a nivel ecosistémico comienza con la mala gestión de los procesos bióticos y abióticos que controlan la disponibilidad de P en suelos (MacDonald y col., 2016). Por lo tanto, el primer paso hacia el uso y manejo sustentable del P es generar conocimiento sobre el ciclo del P a nivel local, adaptable a diferentes contextos sociales, geológicos y ecosistémicos.

Lo anterior exige comprender los principios fundamentales que subyacen al ciclo del P para mejorar nuestra capacidad de gestión de agroecosistemas de una manera rentable y ambientalmente sostenible (Sims & Pierzynski 2005). Para ello, es necesario optimizar los recursos mundiales de fosfato (Oelkers y col., 2008) o, en caso contrario, se puede producir una escasez de P y por consiguiente una escasez de alimentos, sobre

todo en países en desarrollo, donde los agricultores son más vulnerables a la volatilidad de los precios de fertilizantes (Childers y col., 2011).

1.4. Complejidad de los estudios de ciclo del P

La actividad industrial ha causado desequilibrio en el ciclo del P (Hoppe y col., 2016). Por ello, el estudio del ciclo del P se debe proyectar desde enfoques holísticos que permitan entender nuestro planeta como un sistema complejo, constituido, a su vez, por subsistemas interrelacionados e interdependientes, haciendo especial énfasis en los efectos producidos por la actividad humana (Mayer, 1995).

Sin embargo, la diversidad de enfoques para abordar las problemáticas en torno al P, junto con la variabilidad de sus procesos biológicos y geoquímicos entre diferentes suelos dificultan la definición, identificación e interpretación de reservorios, procesos y formas de P, necesarias para la determinación de su biodisponibilidad (Suñer y col., 2018), e impiden la generación de un correcto estudio de la dinámica de este elemento en el suelo.

En este sentido, el estudio del ciclo del P en la literatura es parcelado, enfocado en los intereses específicos y afectado por sesgos de conocimiento de cada investigador/a, derivando en dos problemas o brechas del conocimiento: (i) falta de consenso en las definiciones usadas entre diferentes investigadores al referirse a los reservorios del ciclo del P en suelos, para explicar cada situación local (Tapia & García 2013), y (ii) falta de conocimiento interdisciplinario, principalmente conexión entre química y biología al interpretar aspectos del ciclo geológico y biológico del P.

Las brechas de conocimiento expuestas previamente derivan en la falta de aspectos claves del ciclo del P, tales como dinamismo, interconexión de procesos, evolución temporal e interdisciplinaridad, requeridas para abordar el ciclo del P de manera

sustentable, por ejemplo, manteniendo la salud del suelo en prácticas agrícolas (Esteve & Jaén 2013; Marino y col., 2008).

Lo anterior se explica porque el ciclo del P corresponde a un área de estudio multidisciplinar, donde se pueden encontrar discrepancias conceptuales debido a las diferentes visiones sobre un mismo tema (p.ej. usar distintos nombres para un mismo reservorio), por lo que es necesario establecer un orden preliminar de los conceptos, aclarando y comparando sus características, especialmente cuando se trata de conceptos genéricos o utilizados asumiendo un consenso que empíricamente no existe. Además, los conceptos establecidos suelen acompañarse con hechos, información y conocimiento que también necesitan ser analizados, comparados, sistematizados y organizados para unificar hallazgos procedentes de diferentes áreas de investigación (Nuopponen, 2011).

El análisis conceptual se preocupa por la naturaleza de las definiciones y del lenguaje, ajusta los términos y sus interconexiones. Por lo que permite abordar la complejidad proveniente de la falta de consenso científico, diferentes enfoques experimentales y objetivos, entre otros. Esto gracias a que se examina la diversidad de significados, las posibilidades de conexión entre los términos y los niveles subjetivos y objetivos de cada campo conceptual, además, de que trata de eliminar las inconsistencias derivadas de la falta de precisión en el significado de los conceptos utilizados (Rico & Fernández-Cano 2013).

Los conceptos no existen y no pueden definirse de forma aislada, debido a que obedecen a contextos particulares y son válidos dentro de esos contextos. Por lo tanto, el análisis conceptual debe ser sistemático e inclusivo. Esto conduce a mayor claridad y delimitación conceptual, y facilita la confirmación de la sinonimia, polisemia y equivalencia existentes entre diferentes áreas de investigación, con la finalidad de

obtener una interpretación englobadora y globalizadora desde un nuevo ángulo inexplorado (Nuopponen, 2010). Un ejemplo de esto se refleja en el hecho de que He y col. (1997) mencionan que el reservorio de P obtenido con la metodología de Olsen y col. (1954) representa el P lábil, en tanto, Liu y col. (2010) mencionan que este reservorio representa el P biodisponible. Estos reservorios, aunque poseen nombres distintos, tienen una conexión, ya que ambos representan la disponibilidad del P hacia la biota, por lo que se podrían agrupar, generando una propuesta conceptual en base al reservorio.

1.5. Preguntas de investigación

En búsqueda de una mejor comprensión del ciclo del P en el suelo, este proyecto contempla las siguientes preguntas de investigación: ¿Cómo se estudia el ciclo del P en suelos?, ¿cómo se presentan las brechas de conocimiento en torno a dicho estudio?

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

Caracterizar el estudio del ciclo del P en suelos, considerando brechas del conocimiento dentro de y entre estudios.

1.6.2. Objetivos Específicos

- 1)** Realizar una revisión sistemática y análisis conceptual sobre el ciclo del P en suelos, para extraer información sobre reservorios, procesos y propiedades fisicoquímicas relevantes en diferentes contextos geoquímicos y climáticos.
- 2)** Detectar las brechas de conocimiento sobre el ciclo del P surgidas de la revisión sistemática.
- 3)** Proponer consideraciones para abordar las brechas de conocimiento, considerando la información actual y dar indicaciones para futuras investigaciones.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Revisión sistemática

Se realizó una revisión sistemática de la literatura disponible sobre el ciclo del P en suelos, basada en las preguntas de investigación.

Para ello, se utilizó la opción “búsqueda avanzada” de la plataforma *Web of Science* (<https://webofknowledge.com/>), bajo las condiciones descritas en la Figura 4. Se realizó la búsqueda en octubre del 2020 y en mayo del 2021 se actualizó la búsqueda para abarcar completamente los años desde 1975 a 2020.

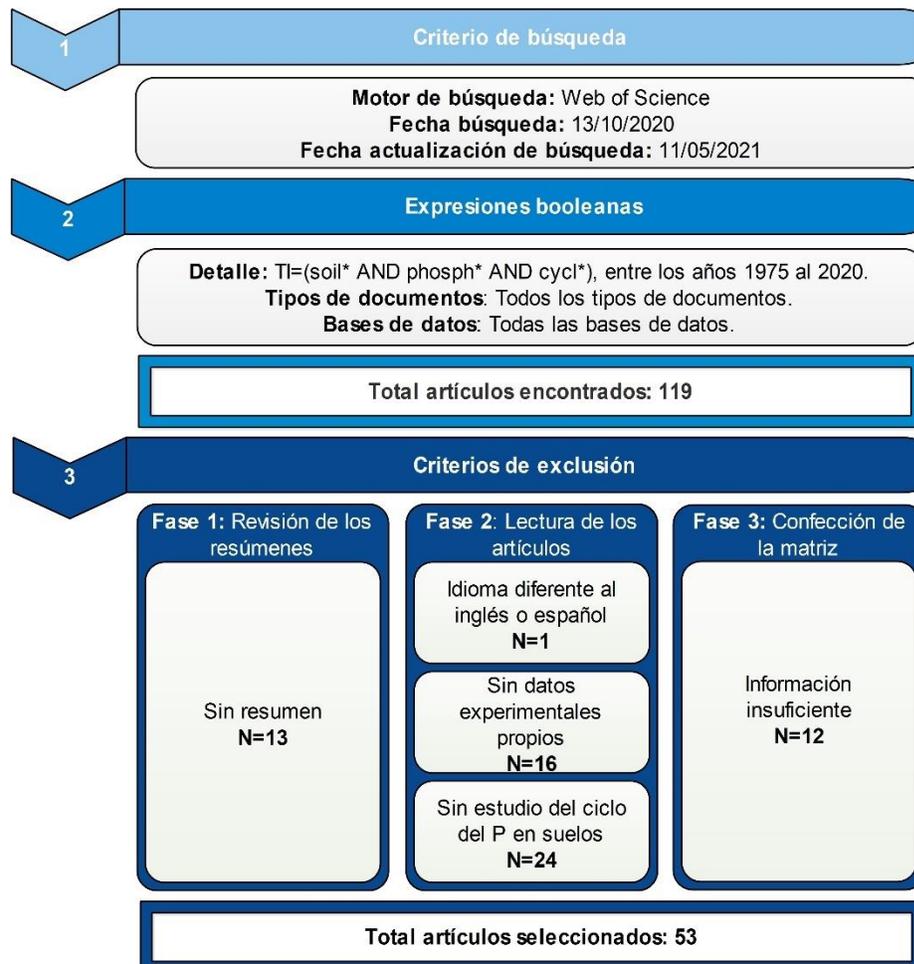


Figura 4. Estructura y criterios de exclusión de la revisión sistemática. La búsqueda se realizó en los títulos, se consideraron todas las bases de datos, y todos los tipos de documentos.

Con los resultados de la búsqueda bibliográfica, se realizó la selección de los artículos, en distintas fases: revisión de resúmenes, lectura de los artículos y confección de la matriz de información. La selección de los artículos consistió en un proceso iterativo entre tres investigadores, en donde cada uno revisó el 100% de los artículos encontrados, analizando los datos hasta llegar a un consenso.

Como se observa en la Figura 4, se aplicaron un total de cinco criterios de exclusión, teniéndose en la fase inicial solo el criterio de “sin resumen”.

En la segunda fase, se aplicaron tres criterios de exclusión, de los cuales el llamado “sin datos experimentales propios”, puso énfasis en la metodología de los trabajos leídos, aceptándose solo la información empírica generada por los autores dentro de cada artículo; por consiguiente, este criterio descartó todos los artículos que se dedican exclusivamente a crear modelos o analizar tendencias y realizar predicciones a partir de información teórica (p.ej. simulación de valores) o información empírica obtenida de otros artículos. En caso de incluir información teórica y datos experimentales propios, se aceptó el artículo aplicando un descarte parcial de su información.

En esta misma fase, el criterio llamado “sin estudio del ciclo del P en suelos” evaluó que los artículos leídos estudiaran el ciclo biogeoquímico del P en el suelo o que estuvieran relacionados directamente con este, considerando reservorios y/o procesos. Por consiguiente, los artículos analizados que estudian los ciclos biogeoquímicos fuera del suelo, elementos diferentes a P en suelos, o que solo incluyeran formas no específicas de P (p.ej. P total) fueron descartados.

En la última fase, los artículos que no fueron descartados por los criterios de exclusión anteriores se analizaron detalladamente para extraer la información necesaria para la creación de la matriz, por lo que “información insuficiente” fue el criterio de exclusión. Por ende, este criterio incluyó los artículos con uno o más reservorios y/o procesos

detectados y analizados explícitamente dentro del ciclo del P, considerando su definición (descripción metodológica o deducción desde la interpretación de resultados) y relevancia (discusión o análisis para generar conocimiento) dentro del artículo. En este sentido, se descartaron los artículos en los cuales no se detectaron reservorios y/o procesos, o que contenían esta información, pero no era analizada o interpretada explícitamente dentro del ciclo del P, independiente del número de reguladores que se registren y de su contextualización.

2.2. Categorización de la información

Se generó una matriz de información a partir de los 53 artículos aceptados. Se distribuyó la información en categorías comprensibles de forma independiente, en función de los objetivos de este trabajo. Las categorías se mencionan a continuación:

- **Contextualización:** se registró el contexto específico en que los autores realizaron el estudio, considerando (i) objetivo/s de los autores, (ii) ecosistema estudiado, (iii) taxonomía del suelo, (iv) tipo de organismos y (v) escala espaciotemporal del estudio; solo si la información se encontraba disponible en el artículo.
- **Reservorios de P:** en esta categoría se registraron los reservorios de P explícitos (según el criterio de “información insuficiente”) y generados dentro de cada artículo (según el criterio “sin datos experimentales propios”). Estos reservorios se separaron en “reservorios internos” los cuales forman parte del ciclo del P dentro del suelo, y los “reservorios externos”. En estos últimos se hizo la diferenciación de (i) P entrada, que son los reservorios que relacionan al P del suelo con fuentes exógenas de P, (ii) P salida, reservorio que relaciona al P del suelo con su salida hacia otros sistemas, y (iii) P otro/s, cuando se estudian reservorios fuera del ciclo del P, sin conectarlo con el sistema de interés de este trabajo durante el estudio.

- Procesos de P: se registraron los procesos explícitos generados dentro de cada artículo, que se encontraban medidos de forma cuantitativa o cualitativa (p.ej. medición de genes relacionados con la solubilización). Se diferenció entre “procesos internos del sistema”, que se refiere a los que forman parte del ciclo del P en el suelo, y “procesos externos”. Estos últimos se separaron en (i) procesos de entrada, que se refiere a fuentes exógenas que ingresan al suelo, y (ii) procesos de salida, que son fuentes que van desde el suelo hacia otros sistemas.
- Metodología de cuantificación de P: se registró la metodología de cuantificación de P en cada artículo.

2.3. Análisis de información y estado del arte

Tras finalizar la elaboración de la matriz de información, se propusieron definiciones para cada uno de los conceptos involucrados en el ciclo del P en el suelo, a partir de los hallazgos detectados en la literatura analizada.

Además, se realizó un análisis de los reservorios internos de cada uno de los artículos aceptados, en donde se propusieron categorías de reservorios desde la revisión sistemática. Estos se basaron en: (i) su definición, derivada de la cuantificación metodológica del reservorio, (ii) su matriz, identificada por la descripción obtenida en la metodología, resultados y/o discusión, y finalmente (iii) su uso, debido a la interpretación de los resultados y discusión de los artículos analizados.

Con los enfoques propuestos, se procedió a categorizar los reservorios de cada uno de los artículos seleccionados. Luego de esto se realizó un análisis de conceptos, para cada uno de los reservorios registrados, el cual tuvo como propósito aclarar la intención de los conceptos, sus relaciones con otros conceptos para revelar sinonimia y así crear

una base de definiciones. Para este análisis, se siguieron las recomendaciones de Nuopponen (2010), teniendo en consideración las siguientes etapas en el análisis:

1) Delimitación del análisis conceptual, centrado en reservorios de P y considerando los objetivos específicos del trabajo.

2) Recopilación del material, mediante la búsqueda bibliográfica y creación de la matriz de información.

3) Adquisición de conocimientos mediante el análisis de la matriz de información, y creación de una idea general del campo, proponiendo nuevas definiciones para el ciclo del P en el suelo a partir de la información encontrada.

4) Elaboración de un sistema conceptual preliminar y/o marco para el análisis, agrupando y definiendo reservorios según enfoques propuestos y conceptos detectados dentro y entre artículos de la matriz de información.

5) Análisis sistemático del material, incorporando análisis cuantitativo a la información derivada del sistema conceptual propuesto.

6) Análisis y conclusiones adicionales de acuerdo con el objetivo del análisis del concepto, considerando proyecciones y propuestas en función de las brechas de conocimiento detectadas y analizadas.

Para el análisis cuantitativo de la información, se realizaron estudios de frecuencias, a través del cálculo de soporte, expresado de la siguiente manera:

$$\text{Soporte}(X) = \frac{\text{\#aparición de la información } X}{\text{\#información total}} \quad (1)$$

La ecuación (1) corresponde al grado o fracción en que cierta información X es mencionada dentro de alguna categoría de la matriz de información (Orozco, 2017). Los resultados de esta ecuación se expresaron en porcentaje, por lo que cada valor obtenido se multiplicó por 100.

Este análisis de frecuencia de información disponible se realizó para las categorías registradas con respecto a la información total, es decir, contextualización, reservorios, y procesos del ciclo del P en suelos; esto incluye las categorías de reservorios propuestos, y cada uno de los reservorios encontrados. También se realizó para las categorías, con respecto a la información existente registrada de cada una, para determinar la distribución de dicha información.

El análisis cuantitativo también incorporó el cálculo de *lift*, el cual es una medida que tiene como propósito analizar el grado de dependencia entre las categorías de la matriz de información, que conforman una regla (Orozco, 2017). La ecuación para este cálculo se expresa de la siguiente manera:

$$Lift(X \rightarrow Y) = \frac{\text{Soporte}(Y \text{ dado } X)}{\text{Soporte}(Y)} \quad (2)$$

Como se puede observar en la ecuación (2), dada una regla de $X \rightarrow Y$, la medida *lift* representa en qué grado Y tiende a ser frecuente cuando X ocurre. A medida que el valor de *lift* se aleja de 1, la ocurrencia de Y es más sensible a la condición X. Por otro lado, si $lift = 1$, Y es independiente de X.

2.4. Detección y análisis de brechas de conocimiento

Con la información obtenida en base a la propuesta conceptual, los cálculos de soporte (ecuación 1), y los cálculos de *lift* (ecuación 2), se detectó si existían brechas de conocimiento en los estudios del ciclo del P en el suelo, y de qué tipo son.

3. RESULTADOS

3.1. Conceptualización del ciclo del P en suelos

3.1.1. Definición propuesta para “reservorio”.

Se encontraron dos tipos de reservorios: internos y externos al suelo.

Los reservorios internos se refieren al estudio de la presencia de P al interior del sistema suelo. Los autores describen a los reservorios internos empleando tres aproximaciones diferentes: (i) su definición, de acuerdo con la interpretación de los autores, (ii) su matriz, según la conexión entre el reservorio y los componentes del suelo, y (iii) su uso, considerando los objetivos de cada artículo y la interpretación dada por los autores. Con esta información, se propusieron cinco categorías de reservorio que representan formas de P en el suelo, las cuales se presentan a continuación:

1) Reservorios asociados a metodologías de extracción (Reservorios metodológicos): representación de formas de P presentes en el suelo que son cuantificadas con algún método de extracción particular, p. ej. P extraído con NaOH.

2) Reservorios asociados a estructuras del suelo (Reservorios estructurales): representación de formas de P presentes en el suelo que se relacionan con la matriz de origen del P, es decir, con la composición del suelo, p.ej. P mineral.

3) Reservorios asociados a procesos (Reservorios mecanísticos): representación de formas de P en el suelo que se enfocan en el proceso que modifica a la matriz de origen de P, donde el nombre de cada reservorio dentro de esta categoría da cuenta de la ocurrencia de un proceso, p.ej. P adsorbido.

4) Reservorios asociados a analitos específicos (Reservorios analíticos): representación de formas de P presentes en el suelo que se enfocan en sus distintas especies (especiación de P). Estos reservorios pueden ser subconjuntos unos de otros,

dependiendo de la especificidad del método de cuantificación (p.ej. HPLC, RMN-P). Un ejemplo de estos reservorios es el Pi.

5) Reservorios asociados a la biodisponibilidad (Reservorios ecológicos): representación de formas de P en el suelo que según su grado de disponibilidad tienen un impacto ecológico en el ecosistema. Esta categoría se denominó así, porque da cuenta de la labilidad, condición necesaria para sostener la biodiversidad al facilitar la asimilación del P. Un ejemplo de esto es el reservorio de P biodisponible.

Por otro lado, los reservorios externos corresponden al estudio de la presencia de P fuera del sistema suelo, independiente de la relación que tienen con este. Estos reservorios podrían clasificarse de acuerdo a las categorías previas (p.ej. P exógeno puede ser inorgánico), sin embargo, este estudio se centró en el ciclo del P dentro del suelo, por lo que los reservorios externos fueron agrupados solo en tres categorías generales:

1) Reservorios de entrada (*input*): implica el ingreso de P al sistema desde una fuente externa, durante el estudio (p.ej. adición de fertilizantes al sistema suelo).

2) Reservorios de salida (*output*): implica la salida de P desde el sistema hacia una fuente externa, durante el estudio (p.ej. lixiviación de P hacia la napa freática).

3) Otros reservorios: implica la presencia de P externo al suelo, no relacionado con este durante el estudio, es decir, un P cuantificado, pero ajeno al suelo estudiado (p.ej. el P hojarasca, que en un estudio de corto periodo no influye significativamente en el suelo).

Teniendo en consideración los hallazgos encontrados, para el concepto de reservorio se propone la siguiente definición formal: "Representación de la presencia de P en compartimentos internos o externos al suelo, mediante una categoría de reservorio determinada (metodológica, estructural, mecanística, analítica o ecológica)".

3.1.2. Definición propuesta para “proceso”.

Se encontraron dos formas de abordar los procesos de P en el suelo: cuantitativa y cualitativa.

La primera forma se caracteriza por utilizar metodologías de detección directa en un intervalo de tiempo determinado. Un ejemplo de esto es el trabajo de Gross & Angert (2017), quienes cuantificaron el proceso de mineralización utilizando técnicas isotópicas. Por el contrario, la forma cualitativa de estudiar procesos se caracteriza por utilizar metodologías de detección indirecta que den cuenta o no de su presencia (dicotómico). Un ejemplo de esto es el trabajo de Liu y col. (2018), quienes detectaron los procesos de solubilización y mineralización (presencia/ausencia) a partir de la abundancia de genes microbianos en muestras de suelo.

Con toda esta información, el concepto de proceso se definió como: “Representación cuantitativa o cualitativa del movimiento o conversión del P entre dos reservorios pertenecientes al sistema, es decir, reservorios de las categorías estructural, mecanística y analítica”.

Esta definición no incluye las categorías metodológica y ecológica, debido a que ambas son parte del sistema, pero se deducen de la aplicación de metodologías y clasificaciones externas al sistema.

Ahora bien, la categoría analítica se incluye solo si involucra conversión entre reservorios de una misma escala de trabajo (p.ej. P_i vs P_o), no entre conjuntos y subconjuntos (p.ej. P_o y P ácido desoxirribonucleico (DNA), ya que el P DNA pertenece tanto al reservorio de P DNA como al P_o).

3.1.3. Definición propuesta para “ciclo del P” en el suelo.

Considerando las definiciones propuestas para reservorio y proceso, se detectaron tres enfoques experimentales del estudio de ciclo del P en literatura.

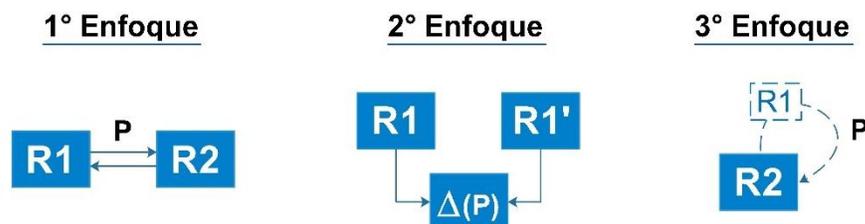


Figura 5. Enfoques experimentales para el estudio del ciclo del P en el suelo, representados por reservorios (R) y los procesos (P).

Como se puede observar en la Figura 5, en el 1º enfoque se estudian los reservorios y el proceso del ciclo del P en el suelo, ya sea cuantificando todo, o cuantificando solo los reservorios y demostrando la presencia de un proceso en forma indirecta es decir, a través de metodologías cualitativas (p.ej. abundancia de ciertos genes en el suelo, actividad enzimática, entre otros), o asumiendo la presencia de un proceso, en base a referencias de otros autores.

En el 2º Enfoque, se estudia explícitamente un mismo reservorio bajo diferentes condiciones experimentales (p.ej. con y sin incubación, con y sin inhibición de la actividad microbiana) y se deduce el proceso de la diferencia en la magnitud de P entre tratamientos.

En el último enfoque que se muestra en la Figura 5, se estudia un solo reservorio que es autorreferente, es decir, el nombre de este indica la presencia de un proceso, y la existencia de un proceso es el resultado de la relación dinámica entre reservorios, por lo que existe un reservorio implícito. Esto indica que este tercer enfoque, utiliza implícitamente el primer y el segundo enfoque, como se muestra en la Figura 6.

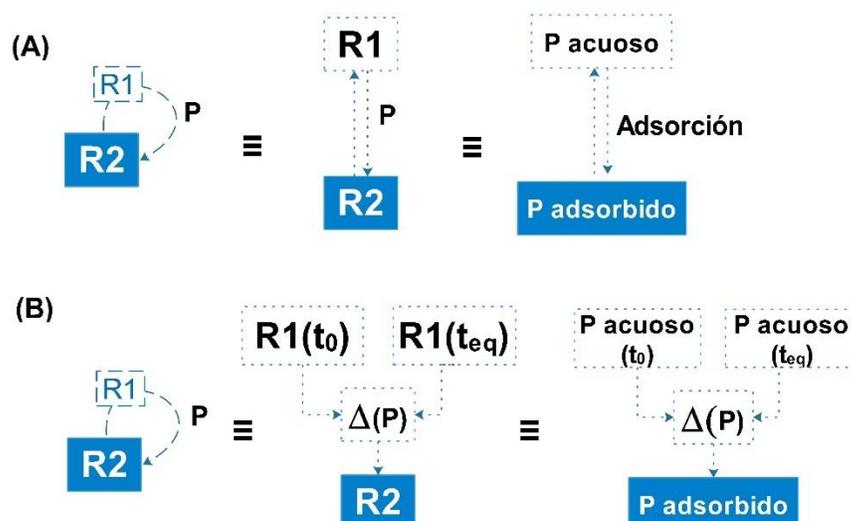


Figura 6. Ejemplo del tercer enfoque experimental usando implícitamente el primer (A) y segundo (B) enfoque para cuantificar P adsorbido.

En el ejemplo (A) de la Figura 6 se muestra un estudio en donde se cuantifica el reservorio de P adsorbido, y de este reservorio se desprende el proceso de adsorción, y el reservorio previo, P acuoso.

En el ejemplo (B) con el segundo enfoque implícito, se tiene el mismo reservorio de P adsorbido. Este reservorio es cuantificado con una isoterma de adsorción, en donde se agrega P acuoso al suelo, midiéndose este reservorio en el tiempo cero, luego en un tiempo de equilibrio, y la diferencia de magnitud en un determinado tiempo indica la capacidad de adsorción del suelo, relacionada con el proceso de adsorción ($\Delta(P)$).

Si bien, este tercer enfoque experimental tiene un propósito equivalente a los otros enfoques respecto a abordar el ciclo del P, es experimentalmente diferente.

Con toda esta información, se propone la definición del ciclo del P como: “dos o más reservorios de P, implícitos o explícitos, pertenecientes a una misma categoría y relacionados mediante uno o más procesos de intercambio de P no nulo entre ellos”.

Esta definición no menciona la naturaleza “cíclica” de un ciclo, debido a que el suelo es un sistema abierto, y es solo una parte de un ciclo mayor, que no ha sido estudiado

en este trabajo. Además, que el suelo es un sistema abierto y no el ciclo completo del P, no es esperable la condición de equilibrio, y es contraintuitiva con respecto a las adiciones (p.ej. fertilizantes) y remociones (p.ej. lixiviación) de P.

3.2. Análisis de conceptos para los reservorios internos de P

3.2.1. Propuesta conceptual para los reservorios internos de P

Los nombres de los reservorios encontrados en la literatura analizada se informan en las Tablas A1-A5. A partir de esta información, se propuso un total de 24 reservorios metodológicos, la mayoría relacionados con la metodología de extracción secuencial relacionadas con el método de Hedley y col. (1982) (n = 12, Tabla 1), seguida por otros métodos de cuantificación (Tabla 2), correspondientes a métodos de extracción de formas de P biodisponibles (n = 6), otras extracciones (n = 5), derivados de procesos (n = 2) y cuantificación directa (n = 1).

Tabla 1. Metodologías de extracción asociadas a los reservorios metodológicos, derivadas de la extracción secuencial de Hedley.

Nombre Propuesto	Metodología de extracción de P asociada a cada reservorio
P H₂O	Se extrae el P con agua ultrapura, con un procedimiento de centrifugación y filtrado. También se puede determinar directamente desde la solución suelo (Siegenthaler y col., 2020).
P resina	Se extrae el P con resina de intercambio aniónico y agua, por 16h (Helfenstein y col., 2018; Richter y col., 2006).
P NaHCO₃	Se extrae el P con bicarbonato de sodio agitando la solución por 16h. Se deja reposar, luego se centrifuga y se filtra el sobrenadante para su posterior determinación (Ma y col., 2020).
P fumigación-extracción	La metodología de este reservorio posee dos pasos a seguir: 1. Fumigación con cloroformo (la mayoría; ej. Dai y col., 2019) u otros solventes orgánicos (p.ej. hexanol (Bünemann y col., 2016)). A veces incluye salinización de la solución (Wanek y col., 2019). 2. Cuantificación por diferencia entre extracción (con resina de intercambio aniónico o con agua) con y sin aplicación de la fumigación (Helfenstein y col., 2018).
P (D)CB	Se extrae el P con una mezcla de citrato de sodio y bicarbonato de sodio (CB) (Celi y col., 2013). Se puede agregar a la mezcla ditionito de sodio, para una mejor eficiencia extractiva (DCB) (Compton & Cole 1998).

P NaOH	Se añade NaOH al suelo y se agita por 16h, luego se centrifuga y se filtra el sobrenadante para su posterior determinación (Xu y col., 2020). Se puede agregar Na ₂ EDTA para una mejor eficiencia extractiva (NaOH/EDTA) (Dynarski y col., 2020).
P us-NaOH	Se añade NaOH al suelo, a una baja temperatura, y luego se somete a sonicación en un determinado tiempo y energía. Finalmente se añade más solución de NaOH y se agita por 16h. Luego se centrifuga y se filtra el sobrenadante para su posterior determinación (Trasar-Cepeda y col., 1993).
P HCl	Se añade HCl 1,0M al suelo y se agita por 16h, luego se centrifuga y se filtra el sobrenadante para su posterior determinación (Siegenthaler y col., 2020). Se puede utilizar HCl 1,0M caliente, para mejorar la extracción (Friesen y col., 1997).
Pi extracciones	Se suman las concentraciones de Pi obtenidas en cada una de las extracciones (Dai y col., 2019).
P digestión	La metodología consiste en una digestión con ácido. Se realiza mayormente con H ₂ SO ₄ mezclado con otros ácidos (p.ej. HNO ₃ , HCl, HClO ₄ , HF) (Xu y col., 2020) o con sales (persulfato de amonio o potasio) (Almeida y col., 2018) o con H ₂ O ₂ (Bünemann y col., 2016). También HNO ₃ mezclado con otros ácidos (p.ej. HClO ₄ , HF, HCl) (Richter y col., 2006), a veces asistido por microondas (Dynarski y col., 2020), u otros ácidos independientes, p.ej. HCl 6M, HClO ₄ (Turner & Newman 2005).
P extracción residuo	Se extrae el residuo de P que queda después de las extracciones secuenciales con método de Hedley y col. (1982). A través de (i) la diferencia entre P digestión aplicado al suelo original y las fracciones de P extraído con la metodología secuencial de Hedley (Helfenstein y col., 2018), o (ii) mediante el cálculo de P digestión en el residuo que queda posterior a todas las extracciones (Xu y col., 2020).

Los reservorios metodológicos que no se encuentran relacionados con las extracciones secuenciales de Hedley, se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Metodologías de extracción asociada a los reservorios metodológicos, derivadas de distintos métodos de cuantificación de P.

Nombre Propuesto	Metodologías de extracción de P asociada a cada reservorio
<i>Reservorios derivados del método de extracción de formas de P biodisponibles</i>	
P Olsen	Corresponde a la extracción de P con NaHCO ₃ 0,5N a pH 8,5 con una relación suelo:solución de 1:20 en un tiempo aproximado de 30 minutos, de acuerdo con el método de Olsen y col. (1954). Este método puede tener modificaciones de diversos autores, por ejemplo, Colwell (1963), en donde se utiliza una dilución de 1:100 en un tiempo de 16h. Esto es debido a que al estar más diluida la solución tiene menos interferencia de la materia orgánica.
P Bray	Corresponde a la extracción de P con NH ₄ F 0,03N y HCl 0,025N, con un tiempo de 1 minuto. Para P Bray-2 solo cambia la concentración del ácido a 0,1N y el tiempo de extracción que es 40 segundos, de acuerdo con el método de Bray Kurtz (1945). La relación suelo:solución para ambos casos es 1:7.

P Mehlich III	Corresponde a la extracción de P con CH ₃ COOH 0,2M, NH ₄ NO ₃ 0,25M, NH ₄ F 0,015M, HNO ₃ 0,013M y EDTA 0,001M a un pH de 2,5, de acuerdo con el método de Mehlich (1984).
P Egner-Riehm	Corresponde a la extracción de P con lactato de amonio 3,5M y ácido acético, a pH 3,75, con una relación suelo:solución de 1:20, a un tiempo de 120 minutos, de acuerdo con el método de Egner y col. (1960).
P Bray-1 digestión	Corresponde a la extracción de P con el método de Bray-1, después de fumigar con CHCl ₃ y remover el CHCl ₃ residual. De la solución obtenida se toma una alícuota y se cuantifica el P total (digestión ácida). Se toma otra alícuota y se cuantifica el Pi (método Murphy y Riley). Finalmente, se restan ambos para la obtención del resultado, de acuerdo con la metodología de Gao y col. (2019).
Reservorios derivados de procesos	
P batch	Consiste en ensayos en donde se añaden distintas concentraciones de P al suelo y se agitan durante un tiempo hasta alcanzar el equilibrio químico, generalmente asumido en 24h. Después de los experimentos de adsorción se le agregan a la solución CaCl ₂ para desplazar el P adsorbido (Han y col., 2018).
P hidrólisis enzimática	Consiste en la hidrólisis de Po hacia Pi mediante la adición de enzimas en dos pasos: 1. Adición de la enzima fosfatasa alcalina (Sun y col., 2019) o fitasa (Almeida y col., 2018) en una muestra de suelo a pH óptimo, con incubación durante 16h. 2. Cuantificación por diferencia entre extracción de Pi con NaHCO ₃ (Sun y col., 2019) o NaOH/EDTA (Almeida y col., 2018), con y sin aplicación de la enzima (Sun y col., 2019) o con enzima activa y desnaturalizada (Almeida y col., 2018). Sun y col., (2019) utilizan Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ ·2H ₂ O para prevenir la adsorción del Pi producido por hidrólisis.
Reservorios derivados de extracciones	
P H₂SO₄	Consiste en agitar suelo seco al aire con una solución de H ₂ SO ₄ . Se centrifuga en un determinado tiempo y luego se filtra (Mardamootoo y col., 2012).
P CaCl₂	Consiste en agitar suelo seco al aire con una solución de CaCl ₂ . Después se debe centrifugar y filtrar (Mardamootoo y col., 2012).
P NaOH con acidificación suave	Consiste en agitar el suelo con H ₂ SO ₄ 1M por 3h. De la solución, se cuantifica el Pi y el P total, y por diferencia se determina el Po: Po(1) = P total - Pi La muestra de suelo ya tratada se enjuaga con etanol (95%), y se seca al aire. Luego se añade NaOH 0,5M y se agita por 6h simulando una hidrólisis de Po a Pi, para extraer Po residual: Po(2) = Pi-NaOH Finalmente, se cuantifica el P NaOH con acidificación suave a través de la suma de entre Po(1) y Po(2) (Gao y col., 2019).
P NaOH con acidificación fuerte	Posterior a la extracción de P NaOH con acidificación suave, se acidifican los extractos de NaOH a un rango de pH de 1,0 a 1,8 para precipitar el P en ácidos húmicos y solubilizar el P en ácidos fúlvicos. Se deja reposar y luego se filtra. Se determina la diferencia de Pi y P total, cuantificados de la solución (Gao y col., 2019).
P NaOH diferencia	Previo a la cuantificación de P NaOH con acidificación fuerte, en las muestras básicas de NaOH se cuantifica Pi y P total (digestión en ácido perclórico). Este reservorio de P se determina mediante la diferencia entre P total, y la suma de Pi con P NaOH con acidificación fuerte (Gao y col., 2019).
Reservorio de cuantificación directa	
P XANES	Las muestras se homogeneizan, muelen y analizan con espectroscopía de estructura fina de borde cercano de absorción de rayos X de borde K (XANES) (Helfenstein y col., 2018).

Los reservorios estructurales detectados en la literatura analizada se agruparon en base a la información expuesta en la Tabla 3.

Tabla 3. Reservorios de la categoría estructural encontrados en la literatura analizada del ciclo del P en suelos.

Nombre Propuesto	Definición del reservorio
P microbiano	P dentro del componente vivo de la materia orgánica del suelo.
P en solución	P que se encuentra en la solución suelo.
P asociado a óxidos	P asociado principalmente a óxidos de Fe y Al. En menor medida, se incluyen formas de P asociadas a Ca o Mn, dependiendo del tipo de suelo estudiado.
P asociado a materia orgánica	P que se encuentra enlazado de manera estable a la materia orgánica del suelo.
P asociado a formas de Ca	P asociado a formas de Ca, sean minerales primarios (principalmente apatita) o secundarios (p.ej. derivados de la precipitación de sales en solución).
P coloides en solución	P asociado a los coloides del suelo. Se obtiene mediante un protocolo de sedimentación y centrifugación.

En la categoría mecanística, solo se encontraron tres reservorios, los cuales se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Reservorios de la categoría mecanística encontrados en la literatura analizada del ciclo del P en suelos.

Nombre Propuesto	Definición del reservorio
P adsorbido	P que se adsorbe en las superficies del suelo.
P desorbido	P que se desorbe desde las superficies del suelo.
P hidrolizado	P hidrolizado por la acción de una enzima.

Para los reservorios analíticos se detectaron un total de 17 reservorios, en donde tres de ellos son subconjuntos del reservorio de “P fracción inorgánica”, y ocho, subconjuntos del reservorio de “P fracción orgánica” (Tabla 5).

Tabla 5. Reservorios de la categoría analítica encontrados en la literatura analizada del ciclo del P en suelos.

Nombre Propuesto	Definición del reservorio
P total	P total (orgánico e inorgánico) que se encuentra en el suelo analizado.
P total inorgánico	Pi total que se encuentra en el suelo analizado. Se determina por colorimetría, usualmente con el método de Murphy & Riley (1962).
P total orgánico	Po total que se encuentra en el suelo analizado. Se obtiene mediante la diferencia entre el P total y el Pi total o bien, entre Pi bajo distintas condiciones.
P fracción total	Fracción de P total obtenida bajo alguna extracción realizada. Al provenir de una extracción, no representa al P total del suelo, sino que al P total extraído con cierto extractante. Usualmente es determinada con ICP-OES.
P fracción inorgánica	Fracción de Pi presente en una extracción en particular. Se determina después de hacer precipitar la materia orgánica de la extracción. Usualmente se determina con el método de Murphy & Riley (1962).
Pi: Ortofosfato	Son formas específicas de Pi. Para la determinación de estas formas, se pueden usar las siguientes técnicas sobre alguno de los reservorios metodológicos: ³¹ P RMN y HPLC.
Pi: Pirofosfato	
Pi: Polifosfatos	
P fracción orgánica	Fracción de Po presente en una extracción en particular. Se determina por diferencia entre el P total y el Pi de la extracción.
Po: Fosfato monoéster	Son formas específicas de Po. Para la determinación de estas formas, se pueden usar las siguientes técnicas sobre alguno de los reservorios metodológicos: ³¹ P RMN y HPLC.
Po: Fosfato diéster	
Po: Fosfatos de inositol	
Po: Fosfatos de myo-inositol	
Po: DNA	
Po: Fosfolípidos	
Po: Ácidos fúlvicos	
Po: Ácidos húmicos	

Finalmente, en la Tabla 6 se presentan los tres reservorios con enfoque ecológico encontrados en la literatura analizada.

Tabla 6. Reservorios de la categoría ecológico encontrados en la literatura analizada del ciclo del P en suelos.

Nombre Propuesto	Definición del reservorio
P biodisponible	P inmediatamente disponible para la biota.
P moderadamente biodisponible	P no inmediatamente disponible para la biota, pero potencialmente disponible en la escala de tiempo del ciclo biológico del P.
P no biodisponible	P no disponible para la biota en la escala de tiempo del ciclo biológico del P.

3.2.2. Información detectada en literatura

En la Tabla 7 se muestra la frecuencia de información de los reservorios de P, internos y externos, registrados en la matriz de información derivada de la aplicación de la propuesta conceptual (<https://figshare.com/s/f41bad8b22984d4051b1>).

Tabla 7. Frecuencia de información de los reservorios de P encontrados en literatura.

Reservorios de P	Cantidad de artículos	Frecuencia información [%]
<i>Internos</i>	53	100
Metodológico	53	100
Analítico	44	83
Ecológico	40	75
Estructural	35	66
Mecánico	9	17
<i>Externos</i>	26	49
Entrada	17	32
Salida	4	7,5
Otros	9	17

Como se observa en la Tabla 7, se registró menos información en los reservorios externos al sistema suelo, siendo el reservorio de entrada el que posee más información en esta categoría.

Ahora bien, todos los artículos seleccionados poseen reservorios internos de P, esto es debido a la metodología de selección de artículos de este trabajo, donde el criterio de información insuficiente derivó en la presencia de reservorios internos metodológicos para todos los casos.

En la Tabla 8 se presenta la frecuencia de información de cada uno de los reservorios metodológicos definidos previamente en las Tablas 1 y 2.

Tabla 8. Frecuencia de información de los reservorios de categoría metodológica, encontrados en la literatura de los estudios del ciclo del P en suelos.

Reservorios metodológicos de P	Cantidad de artículos	Frecuencia de información [%]
<i>Reservorios derivados de la metodología de extracción secuencial</i>		
P H ₂ O	7	13
P resina	15	28
P NaHCO ₃	17	32
P fumigación-extracción	17	32
P (D)CB	3	5,7
P NaOH	24	45
P us-NaOH	2	3,8
P HCl	18	34
Pi extracciones	3	5,7
P digestión	30	57
P extracción residuo	7	13
<i>Reservorios derivados de la extracción de formas de P biodisponibles</i>		
P Olsen	10	19
P Bray	6	11
P Mehlich III	3	5,7
P Égner-Riehm	1	1,9
P Bray-1 digestión	1	1,9
<i>Reservorios derivados de procesos</i>		
P batch	7	13
P hidrólisis enzimática	2	3,8
<i>Reservorios derivados de extracciones</i>		
P H ₂ SO ₄	1	1,9
P CaCl ₂	1	1,9
P NaOH con acidificación suave	1	1,9
P NaOH con acidificación fuerte	1	1,9
P NaOH diferencia	1	1,9
<i>Reservorios de cuantificación directa</i>		
P XANES	1	1,9

Se encontró que los reservorios más estudiados fueron los derivados de la metodología de extracción secuencial de Hedley, siendo el "P NaOH" el reservorio que se detectó en más artículos (34%).

Los reservorios derivados de la extracción de P biodisponible, se tiene que el más utilizado fue el “P Olsen” con un 19%, luego le sigue el “P Bray”, “P Mehlich-III”, “P Égner-Riehm” y “P Bray-1 digestión”.

Solo se encontraron dos reservorios metodológicos derivados de procesos, y de estos el más estudiado fue el “P *batch*” con un 13%.

Finalmente, se observa que los reservorios metodológicos derivados de otras extracciones y de cuantificación directa son los menos estudiados.

Como se mostró en la Tabla 7, se encontraron reservorios analíticos en el 83% de los artículos analizados, y la frecuencia de información de los reservorios de esta categoría se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9. Frecuencia de información de los reservorios de categoría analítica encontrados en la literatura de los estudios del ciclo del P en suelos.

Reservorios analíticos de P	Cantidad de artículos	Frecuencia de información [%]
P total	29	55
P total inorgánico	9	17
P total orgánico	14	26
P fracción total	5	9,4
P fracción inorgánica	32	60
Pi: Ortofosfato	5	9,4
Pi: Pirofosfato	4	7,5
Pi: Polifosfatos	1	1,9
P fracción orgánica	20	38
Po: Fosfato monoéster	6	11
Po: Fosfato diéster	2	3,8
Po: Fosfatos de inositol	1	1,9
Po: Fosfatos de myo-inositol	2	3,8
Po: DNA	4	7,5
Po: Fosfolípidos	2	3,8
Po: Ácidos fúlvicos	1	1,9
Po: Ácidos húmicos	1	1,9

El reservorio de “P fracción inorgánica” fue el más estudiado encontrándose en un 60% de los artículos.

Observando la categorización derivada de la propuesta conceptual de la matriz de información (<https://figshare.com/s/f41bad8b22984d4051b1>), se encontró que los reservorios metodológicos que se encuentran relacionados en un 100% con el “P fracción inorgánica” son: “P resina”, “P (D)CB”, “P HCl” y “Pi extracciones”. No obstante, también se encontró solo un artículo que poseía el reservorio de “P fumigación-extracción”, uno de “P Olsen”, y tres de “P Bray”, los cuales fueron relacionados con el “P fracción inorgánica”.

Adicionalmente, se detectó que los reservorios metodológicos: “P H₂O”, “P NaHCO₃”, “P NaOH” y “P us-NaOH”, pueden relacionarse con el “P fracción inorgánica”, y también con el “P fracción orgánica”.

Para el “P fracción orgánica”, los reservorios metodológicos que se relacionan en un 100% con este, son: “P Bray-1 digestión”, “P NaOH con acidificación suave”, “P NaOH con acidificación fuerte” y “P NaOH diferencia”.

El “P total” se encuentra en un 55% de los artículos analizados. Este tipo de reservorio, al igual que el “P total orgánico”, se relaciona en un 100% con el “P digestión”. Por otro lado, de los 9 artículos en donde se encontró el “P total inorgánico”, un 67% se relaciona con el “P digestión” y un 33% con el “Pi extracciones”.

Como se puede observar en la Tabla 9, muy pocos artículos estudiaron formas específicas de P, siendo los más estudiados el “Fosfato monoéster” dentro de las formas orgánicas (11%), y el “Ortofosfato” dentro de las formas inorgánicas (9,4%).

La mayoría de las formas específicas de P se relacionan con el reservorio metodológico de “P NaOH”. Solo en un artículo aparecen las formas específicas de P, “Fosfato monoéster” y “Fosfato diéster”, relacionadas con el reservorio metodológico de

“P hidrólisis enzimática”; además, en dos artículos se presenta el Po, como “Fosfatos de myo-inositol”.

Cabe mencionar, que los reservorios de Po, “Ácidos fúlvicos” y “Ácidos húmicos”, se relacionaron solo con el “P NaOH con acidificación fuerte” y “P NaOH diferencia”, respectivamente.

La información de la Tabla 7, indica que los reservorios ecológicos se encuentran en un total de 75% de los artículos estudiados, y tan solo se detectaron tres grandes reservorios, los cuales se muestran en la Tabla 10. El reservorio más estudiado en la categoría ecológica fue el P biodisponible, presente en un 68% de los artículos analizados.

Tabla 10. Frecuencia de información de los reservorios de categoría ecológica encontrados en la literatura de los estudios del ciclo del P en suelos.

Reservorios ecológicos de P	Cantidad de artículos	Frecuencia de información [%]
P biodisponible	36	68
P moderadamente biodisponible	14	26
P no biodisponible	14	26

Analizando la información recopilada, se detectó que el “P biodisponible” se encuentra en todos los artículos que presentan reservorios metodológicos derivados de la extracción de formas de P biodisponibles (Tabla 2). Además, existen otros reservorios metodológicos que son vinculados con el “P biodisponible”, los cuales son el “P resina” (87%), “P NaHCO₃” (76%) y “P H₂O” (43%).

El “P moderadamente biodisponible” se encontró en solo 14 artículos, y de estos, el 79% se relaciona con el “P NaOH”, el 14% con el “P fumigación-extracción” y el 7% con el “P NaOH con acidificación suave”.

Finalmente, se encontró que el “P no biodisponible” se relaciona con los siguientes reservorios metodológicos: “P HCl” (86%), “P extracción-residuo” (21%) y “P(D)CB”, “P NaOH con acidificación fuerte”, “P NaOH diferencia”, y “P us-NaOH” (7% cada uno).

Continuando con el análisis de la Tabla 7, se tiene que los reservorios estructurales se encuentran en el 66% de los artículos. Dentro de esta categoría se tiene que los reservorios más estudiados son el “P asociado a óxidos” (36%) y el “P microbiano” (32%), tal y como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Frecuencia de información de los reservorios con categoría estructural encontrados en la literatura de los estudios del ciclo del P en suelos.

Reservorios estructurales de P	Cantidad de artículos	Frecuencia de información [%]
P microbiano	17	32
P en solución	8	15
P asociado a óxidos	19	36
P asociado a materia orgánica	3	5,7
P asociado a formas de Ca	14	26
P coloides en solución	1	1,9

En la categorización derivada de la propuesta conceptual de la matriz de información de la matriz de información (<https://figshare.com/s/f41bad8b22984d4051b1>), se encontró que de los 19 artículos que presentaron “P asociado a óxidos”, un 95% se relaciona con el “P NaOH”, el 10% se relaciona con “P (D)CB” y el 5% con el “P XANES”. Ahora bien, el “P asociado a materia orgánica” también se relacionó con los reservorios metodológicos de “P NaOH” (67%) y “P XANES” (33%).

Enfocándose en el “P microbiano”, todos los autores relacionaron este reservorio con el reservorio metodológico de “P fumigación-extracción”.

Para el “P asociado a formas de Ca”, de los 14 artículos en donde se encontró, el 93% se relaciona con el “P HCl” y el 7% se relaciona con “P XANES”.

El “P en solución” se detectó en solo 8 artículos. Dentro de estos artículos, el 50% se relacionó con el “P resina”, el 37% con “P H₂O”, y también se relacionó con el “P NaOH” y el “P Mehlich III”, con el 12% en cada una.

Finalmente, el “P coloides en solución” se detectó en solo un artículo, y se relacionó con el “P NaOH”.

De todos los reservorios, el mecanístico es el único que se encuentra en menos de la mitad de los artículos analizados, y los reservorios encontrados dentro de esta categoría se pueden observar en la Tabla 12.

Tabla 12. Frecuencia de información de los reservorios de categoría mecánica encontrados en la literatura de los estudios del ciclo del P en suelos.

Reservorios mecanísticos de P	Cantidad de artículos	Frecuencia de información [%]
P adsorbido	7	13
P desorbido	6	11
P hidrolizado	2	3,8

El reservorio de “P adsorbido” y “P desorbido” se relacionan con el reservorio metodológico, “P *batch*”. No tienen descripción estructural, ecológica ni analítica, pues su cuantificación implica la adición de P exógeno para extraer información sobre el proceso de adsorción en condiciones ideales (concentración inicial de P controlada, ausencia de lixiviación, tiempo predefinido), difícilmente comparables al sistema real.

Por otro lado, se consideró el “P hidrolizado” dentro de la categoría mecánica debido a que los autores que estudiaron este reservorio asumen que la hidrólisis es la principal fuente de P para la biota, es decir, existe una asociación entre hidrólisis y mineralización. Este reservorio se relaciona directamente con el “P hidrólisis enzimática” (reservorio metodológico), y el reservorio de “P biodisponible” (reservorio ecológico).

Además, se relacionó con tres formas específicas de Po de la categoría analítica, las cuales son: “P fosfato monoéster”, “P fosfato diéster” y “P fosfato de myo-inositol”.

3.2.3. Brechas de conocimiento detectadas para los reservorios de P

Con la información expuesta anteriormente, se detectó que una de las principales brechas de conocimiento en torno a los reservorios de P en suelos es la falta de consenso y claridad al describir estos reservorios. Esto debido a que se registraron diversos nombres para conceptos similares (Tablas A1-A5). Este análisis también da cuenta de que, en algunos casos, los autores son muy detallados al describir el reservorio que estudian, por el contrario, otros son imprecisos. En muchas ocasiones eso generó la sensación de que se comparaban reservorios diferentes, aun cuando la metodología era equivalente, esto da cuenta que las diferencias descriptivas son parte de las brechas de conocimiento.

Referente a esta brecha, también se encontró que los autores no siempre coinciden en las relaciones entre sus reservorios. Esto se puede demostrar con un ejemplo con información registrada antes de las correcciones. Para el reservorio de “P microbiano”, solo dos trabajos conectaban este P con reservorios de enfoque ecológico: Piotrowska-Długosz & Wilczewski (2020), quienes lo relacionaban con el P lábil, y Yevdokimov y col. (2016), quienes lo relacionaron con el P insoluble, todo lo cual se afirmaba bajo referencias de otros autores. Esta discrepancia se solucionó recurriendo a la información de los trabajos citados, para así considerar la escala en la que se biodisponibiliza el P en cada ecosistema según la información de literatura, por lo que finalmente se estableció, al hacer el análisis de conceptos, que estos autores se referían al P moderadamente biodisponible.

3.3. Frecuencia y análisis de información

3.3.1. Contextualización

Se analizaron los objetivos presentados por los autores en cada uno de los artículos estudiados, encontrándose dos grupos de objetivos, relacionados con la generación de conocimiento: “Agrícola”, que se refiere a objetivos que se limitan a contextos agronómicos, y “Fundamental”, que consiste en objetivos relacionados con evidencia empírica sin aplicación concreta.

En la Figura 7 se muestran las subdivisiones de cada uno de los grupos de objetivos encontrados.

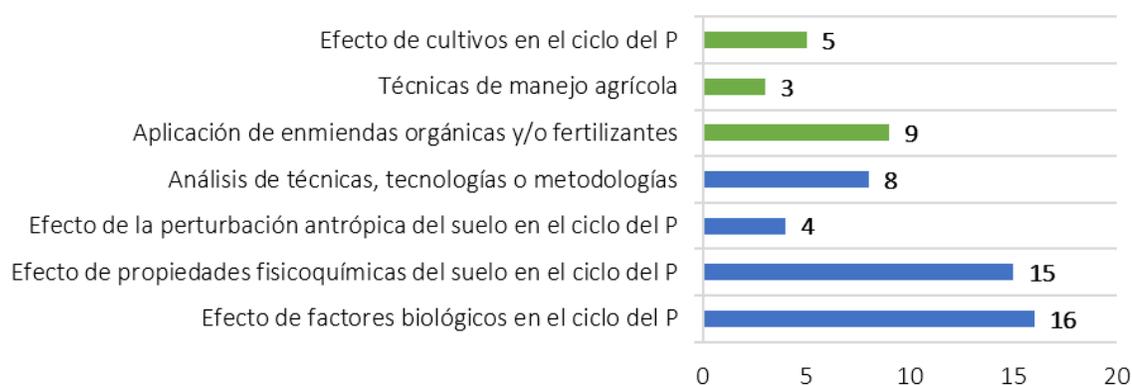


Figura 7. Frecuencia de información de los objetivos detectados en literatura. En verde: objetivos agrícolas. En azul: objetivos fundamentales.

Tal y como se muestra en la Figura 7, los objetivos de tipo agrícola se dividen en: (i) efecto de cultivos en el ciclo del P (9,4%); ejemplificado con el trabajo de Maltais-Landry y col. (2014), quienes tuvieron como objetivo comparar cómo los cultivos de cereales y leguminosas afectan al ciclo del P en suelos; (ii) técnicas de manejo agrícola (5,7%); ejemplificado con el trabajo de Almeida y col. (2018), cuyo objetivo fue mejorar la dinámica del P con rotación de cultivos en los trópicos; y por último, (iii) aplicación de enmiendas orgánicas y/o fertilizantes (17%); ejemplo de lo cual se puede observar en

el trabajo de Solaiman y col. (2019), cuyo objetivo fue comprender cómo el *biochar* puede aportar en la fertilidad del suelo.

Por otro lado, los objetivos de tipo fundamental se dividen en: (i) análisis de técnicas, tecnologías o metodologías (15%); por ejemplo Liu y col. (2018) utilizaron técnicas químicas avanzadas y secuenciación metagenómica para estudiar el ciclo del P del suelo; (ii) efecto de la perturbación antrópica del suelo en el ciclo del P (7,5%); como en el trabajo de Trasar-Cepeda y col. (1993), quienes estudiaron el ciclo del P en los suelos de la mina Meirama (España); (iii) efecto de propiedades fisicoquímicas del suelo en el ciclo del P (28%); como por ejemplo en Messiga y col. (2009), quienes evaluaron el efecto de los ciclos de congelación-descongelación sobre la biodisponibilidad del P; y finalmente (iv) efecto de factores biológicos en el ciclo del P (30%), ejemplificado por el trabajo de Crowley & Bedford (2011), quienes estudian los efectos de los musgos en la biodisponibilidad del P en suelos.

Dentro de los objetivos relacionados con los efectos de propiedades fisicoquímicas del suelo en el ciclo del P, se encontró que 7 de estos objetivos son acerca de estudios de ciclos de congelación-descongelación. Analizando tendencias en la matriz de información, se detectó que de artículos que poseen el reservorio de "P *batch*", el 67% de estos se vinculan con objetivos relacionados a los estudios de ciclos de congelación-descongelación.

La Tabla 13 presenta la frecuencia de información para la contextualización de los artículos analizados.

Tabla 13. Frecuencia de información de la contextualización de los estudios del ciclo del P en suelos, encontrada en la literatura.

Contextualización	Cantidad	Frecuencia de información [%]
Ecosistema estudiado	46	87
Clima	36	68
Taxonomía del suelo	37	70
Tipo de organismos	37	70
Escala espacial	53	100
Escala temporal	22	41

Se puede observar en la Tabla 13, que todos los autores informan la escala espacial, es decir, la extensión espacial asociada a la localización específica desde donde extrajeron las muestras de suelo. Sin embargo, no todos fueron específicos al mencionar el ecosistema que se estudió; independiente de ello, los artículos que no poseían esta información contextualizan el lugar del estudio con información del clima, taxonomía del suelo, o los tipos de organismos encontrados.

Por último, se observa que la escala temporal se registró en menos de la mitad de los artículos, y que de los 22 artículos que daban esta información, se tiene que el 72% de los casos son estudios a largo plazo (<https://figshare.com/s/f41bad8b22984d4051b1>).

La Figura 8 muestra la información acerca de qué tipo de ecosistemas se estudiaron en los artículos analizados.

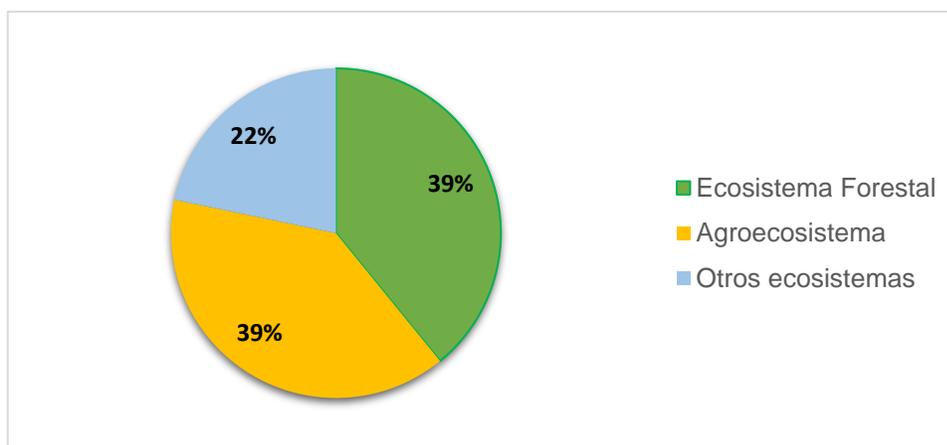


Figura 8. Representación gráfica de la información de los ecosistemas que se encontraron en los estudios del ciclo del P en suelos.

En la Figura 8 se puede observar que los ecosistemas más estudiados fueron el “Ecosistema forestal”, que consiste en áreas en las que dominan los árboles, donde existen comunidades biológicamente integradas; y el “Agroecosistema”, que consiste en ecosistemas modificados y gestionados por los seres humanos con objetivos alimenticios. Además, de la figura se desglosa que los otros ecosistemas estudiados fueron de baja frecuencia por lo que se agruparon.

Se hizo un análisis de *lift* para las asociaciones “ecosistema => P biodisponible”, considerando Agroecosistemas y Ecosistemas forestales, en donde solo para el “Agroecosistema” el *lift* obtenido fue mayor a 1 (Tabla A6 del anexo), por lo que es más probable que se cuantifique el “P biodisponible” al estudiar los Agroecosistemas, con respecto al total de casos dentro de la matriz.

3.3.2. Estudios agrícolas

La información de la Figura 7 muestra que 17 artículos presentan un objetivo del grupo agrícola (32%), y estos fueron los únicos objetivos que tenían una aplicación concreta,

a diferencia de los objetivos fundamentales. Por ello, los análisis se centraron en este tipo de objetivo.

Para estos análisis se realizaron distintos cálculos de *lift*, así conocer variaciones en la probabilidad de ocurrencia de distintas categorías de información, asociadas a objetivos agrícolas en los artículos.

Se analizó el *lift* de: (i) agroecosistemas, (ii) reservorios ecológicos, (iii) P biodisponible, y (iv) reservorios de entrada, obteniéndose en todos, un resultado de *lift* mayor a 1 (Tabla A6 del anexo), lo cual indica que es más probable que se tengan agroecosistemas y se registren reservorios de entrada y ecológicos, en particular P biodisponible, cuando los artículos tengan un objetivo agrícola.

Relacionándose con esto, se observa en la Tabla 7 que muy pocos artículos evalúan los reservorios de salida, pero cuando se incluyeron, estos fueron P adquirido por plantas y/o cultivos. Para este caso no se hizo un cálculo del *lift* ya que se poseía muy poca información, pero se encontró que de los cuatro artículos que cuantificaron reservorios de salida, el 75% de ellos se relacionaban con objetivos agrícolas.

3.3.3. Procesos

La frecuencia de información relacionada con los procesos del ciclo del P en suelos se muestra en la Figura 9.

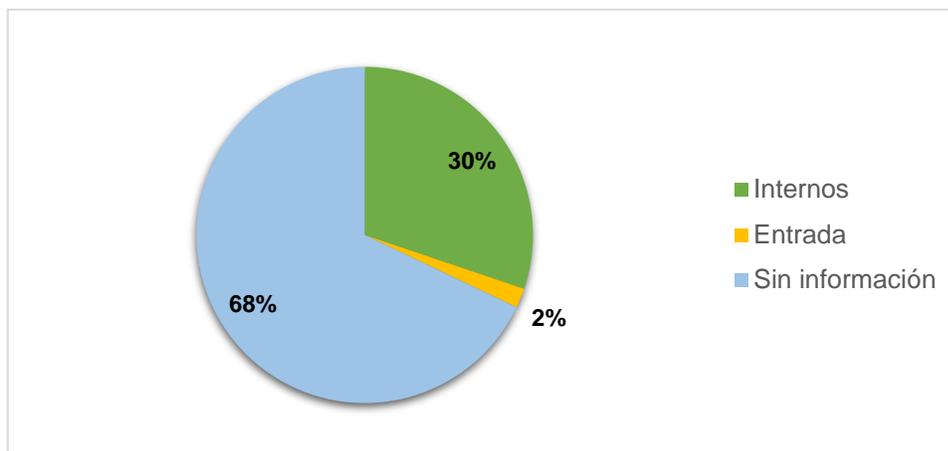


Figura 9. Información de los procesos encontrados en los estudios del ciclo del P en suelos.

Los procesos internos estudiados fueron mineralización (56%), inmovilización (43,7%), solubilización (31,2%), *turnover* microbiano (18,7%), absorción (12,5%), adsorción (6,2%) y desorción (6,2%).

Como se observa en la Figura 9, los procesos externos correspondieron solamente a procesos de entrada y representaron solo el 2% de los artículos estudiados. Además, la mayoría de los artículos no informó procesos, centrándose solo en reservorios.

4. DISCUSIÓN

4.1. Evaluación de los criterios de selección de artículos y extracción de información

Las definiciones propuestas en este trabajo fueron interpretaciones de los artículos analizados, debido a que la mayoría de los autores no definió sus reservorios y/o procesos analizados, lo cual dificultó el estudio. Si bien todos los artículos explican el tema de estudio, el no especificar conceptos conlleva a diferentes interpretaciones por parte de los lectores, y se considera que las definiciones de conceptos son necesarias para la presentación coherente de un tema en la ciencia (Galili & Lehavi 2006).

Andersohn (1996), describe de forma breve el proceso de mineralización, el cual fue estudiado en su trabajo. Compton & Cole (1998), incluyen en su artículo una sección especial para definir e interpretar cada uno de los reservorios analizados en su estudio. Estos trabajos se destacan debido a que sus breves descripciones ayudan a la mejor comprensión de los lectores, lo que es relevante ya que los estudios de los ciclos biogeoquímicos de nutrientes son multidisciplinarios, por lo que no siempre existe un consenso en las definiciones y conceptos utilizados (Guzmán-Gómez, 2005).

Por otro lado, se encontraron artículos como los de Fan y col. (2014), Solaiman y col. (2019), entre otros, en donde no se mencionaba la metodología utilizada para la cuantificación de alguno de sus reservorios. Estos reservorios no se registraron ya que incumplían la metodología de este trabajo (registrar solo los reservorios con su metodología descrita, y analizados dentro del ciclo del P en suelos). Además, se encontraron artículos que no especificaban la metodología utilizada, pero citaban a otros autores; en estos casos se consideraron los reservorios solo si el artículo citado cumple con los criterios definidos previamente, es decir, estaba disponible para su lectura e

informaba claramente la metodología. Esto implicó descartar un reservorio del artículo de Solaiman y col. (2019) que citó el artículo de Condrón y col. (1990), ya que, si bien este último artículo se encontró disponible, en él aparecían tres metodologías diferentes para el mismo reservorio, por lo que no estaba claro cuál de todas se utilizó.

Considerando lo anterior, es imprescindible describir la metodología utilizada, aun si esta se basa en otro artículo, para evitar que los lectores deban recurrir a otro artículo para entender el procedimiento realizado y evitar la pérdida de reproducibilidad del artículo por falta de información.

Sobre las formas metodológicas de estudiar el ciclo del P en suelos, se encontró que la mayoría de los artículos utilizaba el primer enfoque (Figura 5), que se refiere a estudiar los reservorios y procesos del ciclo del P, pero la principal forma en que lo abordan en la literatura es cuantificando los reservorios de P y asumiendo la presencia de un proceso en base a referencias de otros artículos. Sin embargo, asumir un proceso en los estudios de P en el suelo produce incertidumbre sobre la representatividad del ciclo del P sugerido, lo que significa abordar el sistema sin comprender ni validar su comportamiento real (Salas-Zapata y col., 2011). Además, no siempre se podrá relacionar con otros artículos, debido a que los procesos se ven afectados por los microorganismos dentro del suelo y el contexto ambiental, específicamente del clima de la zona, las propiedades fisicoquímicas del suelo e historias de perturbaciones antrópicas (p.ej. cambio en el uso de suelo). En este sentido, combinar información sobre procesos de diferentes estudios para analizar la ocurrencia y relevancia de procesos puede ser ambiguo (Mooshammer y col., 2017).

4.2. Análisis de la propuesta conceptual para reservorios internos

4.2.1. Alcances y limitaciones de la propuesta conceptual

Las principales dificultades que se generaron en el análisis de los conceptos de los reservorios internos de P consistieron en agrupar los términos conceptualmente idénticos que poseían diferente nombre, por lo que la metodología de cuantificación de los reservorios fue usada como guía para conocer las similitudes de conceptos. Debido a esto, los reservorios metodológicos fueron los primeros en ser analizados, para luego orientar los análisis de las demás categorías de reservorios.

Los nombres propuestos para los reservorios metodológicos (Tablas 1 y 2) derivan de su relación con los extractantes y/o procedimientos utilizados, y/o algún nombre que se repetía más dentro de los encontrados en la literatura.

Se encontraron variados reservorios metodológicos relacionados con extracciones secuenciales de P, siendo común la metodología de extracción secuencial de Hedley y col. (1982) y modificaciones de esta, debido a que ha probado ser eficiente para muestras obtenidas desde distintos tipos de ecosistemas naturales y proporciona un índice general de cómo las formas biológicas y geoquímicas del P cambian durante el desarrollo del suelo (Cross & Schlesinger 1995).

La preferencia por un método concreto (Hedley) facilita la comparación entre artículos, lo que da más peso al uso de estos reservorios como base para el análisis del resto, debido a que esta metodología conecta los reservorios estructurales con los ecológicos y los analíticos.

Los reservorios de otras categorías se agruparon por características similares, y los nombres propuestos se basaron en la representación e información general de estos.

En la categoría estructural (Tabla 3), el reservorio de “P asociado a óxidos” tuvo mayor cantidad de nombres distintos (Tabla A2), debido a que se detectaron diferentes grados

de especificidad entre artículos al mencionar la estructura desde donde se obtenía el P. Por ejemplo, Beck & Elsenbeer (1999) consideraron “P unido a Al amorfo”, un tipo particular de óxido. Los autores fueron específicos al nombrarlo debido a que estudiaron la podzolización y, para ello, se analizó cómo los suelos diferían en el Al amorfo. Otro caso que fue específico es el de Helfenstein y col. (2018), quienes solo consideraron “P Hematita (para representar especies de P Fe)”, esto debido a que la metodología de cuantificación fue con espectroscopia XANES (*X-ray Absorption Near Edge Structure*), una técnica específica que determinó a la hematita como el óxido más relevante para ese estudio.

Por consiguiente, el “P asociado a óxidos” engloba muchas formas de P específicas y complica la comparación entre artículos, por lo que se debe tener cuidado al considerarlo en un estudio o en la interpretación de los resultados. Esto podría repetirse dependiendo del grado de especificidad utilizado en otros artículos o de variaciones metodológicas para su cuantificación.

En la categoría ecológica (Tabla 6), los autores utilizaron diferentes términos para describir lo que querían representar, relacionados en la mayoría de los casos con referencias de autores que realizaron o modificaron la metodología utilizada. En el caso del “P no biodisponible”, se encontraron los conceptos de “insoluble” y “ocluido”, los cuales no son sinónimos. El P insoluble corresponde al P que no se encuentra en solución, está formando parte de los minerales primarios y secundarios, y constituye la gran reserva de P en el suelo; por otro lado, el P ocluido se refiere a formas de P que quedan retenidas casi irreversiblemente debido a procesos físicos o químicos, lo que se considera prácticamente una pérdida de P del suelo (Undurraga, 1999). De igual manera, los autores que aplicaban estos conceptos en sus análisis se referían a un tipo de P que

no se encuentra disponible para la biota, y utilizaban estos términos como posibles explicaciones, pero no como lo que realmente ocurre con precisión.

Por otro lado, en el caso del reservorio “P biodisponible”, se encontraron términos como “P lábil”, “P disponible para plantas”, “P más lábil”, entre otros (Tabla A5). El P lábil representa a los fosfatos débilmente adsorbidos, que poseen mayor solubilidad, y formas orgánicas de fácil y rápida mineralización, que están en equilibrio con el P en solución (Costa y col., 2016; Tonello y col., 2019); y el P disponible corresponde a una fracción de P de la solución suelo y P que se encuentra en la fase sólida, pero susceptible a ser asimilada por la biota (Rojas, 2006). Además, el P más lábil o menos lábil, que fueron descritos por los autores, hace referencia a formas de P que fueron extraídas con técnicas secuenciales, como lo son las extracciones de agua, resina de intercambio iónico y bicarbonato de sodio. Al realizar todas estas extracciones de manera secuencial, la primera representa la forma más lábil de P, y le siguen las demás (Hedley y col. 1982). No obstante, estas definiciones están condicionadas a un procedimiento específico y, por lo tanto, no ofrecen definiciones útiles para explicar el comportamiento o estado del sistema, por lo que no se consideraron en la propuesta conceptual.

La propuesta conceptual de los reservorios ecológicos engloba diferentes formas de interpretar la biodisponibilidad, basándose en la escala temporal en la que el P es liberado a la solución suelo, todo esto para no condicionarlo a un método, ni omitir o dar información errada.

4.2.2. Análisis de casos particulares

La propuesta conceptual considera pocos reservorios mecanísticos, y esto está relacionado con que generalmente se estudia el ciclo del P con el prime enfoque (Figura 5), pero los procesos suelen asumirse. Esto explica que haya pocos procesos estudiados

y que los reservorios sean independizados de esos procesos, resultando en una baja cantidad de reservorios mecanísticos. En este sentido, los reservorios mecanísticos, como su nombre lo indica, son relevantes para validar el comportamiento potencial de un sistema (p.ej. capacidad de adsorción, capacidad de mineralización), pero lamentablemente la propuesta conceptual está limitada por la falta de información.

Este problema también ocurre en los reservorios metodológicos derivados de procesos, en donde se encuentra el “P *batch*” y el “P hidrólisis enzimática”, que se relacionan estrechamente con los reservorios mecanísticos encontrados. Al ser pocos artículos que abordan estos reservorios, la propuesta conceptual podría tener incertidumbre, implicando que la definición que se propuso no sea tan aplicable.

Los reservorios de “P H₂SO₄” y “P CaCl₂” (Tabla 2) se detectaron en un solo artículo (Mardamootoo y col., 2012) como pruebas de suelo agronómico, ya que predicen la escorrentía superficial de P, útil para evaluar la contaminación de agua dulce. La escorrentía es un proceso y, como se mencionó con anterioridad, los procesos se estudiaron en menor cantidad, por lo que también eso afecta la frecuencia de aparición de estos reservorios. Además, estos reservorios están relacionados estrechamente con objetivos agrícolas, los cuales se encontraron en menos de la mitad de los artículos.

Los reservorios de “P Bray-1 digestión”, “P NaOH con acidificación suave”, “P NaOH con acidificación fuerte” y “P NaOH diferencia”, se estudiaron solo en el artículo de Gao y col. (2019). Estos reservorios representan una metodología secuencial para extraer solo las formas de Po con distinta biodisponibilidad. Esta metodología secuencial es equivalente a la de Hedley, pero con procedimientos distintos, que lo hacen más específico, enfocándose en la extracción de P desde la materia orgánica.

4.3. Análisis de categorías y brechas de conocimiento

4.3.1. Vinculación entre categorías

Centrándose en el análisis de los reservorios internos del ciclo del P en suelos, se encontró que la mayoría de los trabajos estudiados poseen más de una categoría de reservorio (<https://figshare.com/s/f41bad8b22984d4051b1>), conectadas entre sí durante la interpretación de resultados de los autores. Esto genera un mejor entendimiento de los reservorios, debido a que el aprendizaje se favorece a través de la asociación de conocimiento, es decir, relacionar información conocida con información nueva (Romero, 2009). Entonces, ya definidos los reservorios en la propuesta conceptual, su vinculación es un paso necesario para comprender la multidimensionalidad del ciclo del P, fortaleciendo su comprensión metodológica, estructural, ecológica, analítica y mecanística utilizando los reservorios homónimos. La complejidad del ciclo del P queda expuesta, pero a la vez resulta abordable relacionando reservorios de diferentes categorías.

Los reservorios categorizados como metodológicos se encontraron en todos los artículos, debido a que solo se registraron los reservorios que tenían una metodología explícita, por lo que las demás categorías de reservorios dependen de esta. Cabe destacar que no se encontraron reservorios que se conectaran con todas las categorías propuestas, esto es debido a diferentes causas relacionadas con la metodología en cuestión, por lo que es imprescindible comenzar el análisis de los reservorios con la categoría metodológica.

El reservorio de “P digestión” fue el que se encontró en más artículos (57%, Tabla 8), y solo se relaciona con el “P total”, “P total inorgánico” y “P total orgánico”, de la categoría analítica. Estos reservorios no tienen una categoría estructural, mecanística o ecológica, pues representan una forma de P inespecífica. Estas formas no entregan información

sobre la dinámica del P en el suelo, por ello en este trabajo no se aceptaron artículos que solo estudiaban este tipo de reservorio (criterio de exclusión “Sin estudios del ciclo del P en suelos”, Figura 4). Por consecuencia, los estudios de estos reservorios incluyen otros reservorios más específicos.

Otros reservorios sin información estructural son los derivados de la extracción de formas de P biodisponibles. Esto se debe a que la finalidad principal de su metodología es abarcar las diferentes formas de P disponible para la biota (reservorios ecológicos) sin importar el origen estructural del P extraído. No obstante, se pueden relacionar con los reservorios metodológicos derivados del método de Hedley y col. (1982), vinculados a su vez con reservorios estructurales, para tener una aproximación indirecta de los reservorios estructurales de estas formas de P. Por ejemplo, el “P Olsen” es similar al “P NaHCO₃”, debido a que utilizan el mismo extractante, y podría interpretarse de forma equivalente. Sin embargo, antes de realizar estas aproximaciones se debe considerar que las condiciones experimentales de estos reservorios son diferentes: (i) “P Olsen” usa un pH controlado de 8,5, en cambio “P NaHCO₃” no controla el pH, (ii) “P Olsen” es una extracción que necesita un tiempo de 30 minutos, y “P NaHCO₃”, usualmente se realiza en 16 horas, (iii) “P Olsen” se aplica sobre la muestra de suelo sin pretratamiento, mientras que “P NaHCO₃” generalmente es precedido por otra(s) extracción(es) (“P H₂O”, “P resina”), y (iv) la relación suelo:solución difiere, con 1:20 para “P Olsen” y 1:60 para “P NaHCO₃” (Olsen y col., 1954; Hedley y col., 1982).

Además, “P Olsen” fue el más utilizado de los reservorios metodológicos derivados de la extracción de formas de P biodisponibles (Tabla 8). Esto es debido a que originalmente se desarrolló para suelos calcáreos, pero se ha encontrado adecuado para suelos ácidos (Menon y col., 1990), abarcando una mayor variedad de suelos con respecto a las otras metodologías. Sin embargo, autores como Fernández-Marcos

(1997) y Shuman y col. (1988) informan que el “P Bray” o “P Mehlich III”, en algunos suelos ácidos predicen de mejor manera el P biodisponible.

También se han reportado conexiones del “P Olsen” y “P Bray” con “P fracción inorgánica” (Solaiman y col., (2019); Heuck y col., (2018); Vincent y col., (2010); Compton & Cole (1998)). Por otro lado, Gao y col. (2019), relacionó el “P Bray-1 digestión” con el “P fracción orgánica”.

Estas conexiones dependen de la especiación del P derivado de la metodología, y frente a este detalle metodológico, la mayoría de los autores no hacen referencia a una conexión con los reservorios analíticos. Esto, a pesar de que, la determinación de estos reservorios se realiza por colorimetría según el método de Murphy & Riley (1962) (Vargas y col., 1992), determinando el Pi disuelto por formación de un complejo azul con molibdato (Murphy & Riley 1962).

En este sentido, el asumir en todos los suelos que estas metodologías extraen solo P fracción inorgánica podría conllevar a una sobreestimación de este, debido a que también extraen una parte de Po, que se hidroliza debido a la solución extractante (Horta, 2005; Bowman & Cole 1978). Miller & Arai (2017) mencionan que la extracción de Bray-1 y Mehlich III, es cuestionada por su sobrestimación de P biodisponible, debido a que la acidez de estas extracciones puede hidrolizar especies de P orgánicas y polifosfatos, siendo más probable en los suelos con mayor porcentaje de materia orgánica (Fernández-Marcos, 1997).

También los reservorios de “P resina”, “P NaHCO₃” y “P H₂O”, se relacionan con el “P biodisponible”. En el caso de “P resina”, se utiliza una resina de intercambio aniónico que extrae el P que se encuentra disponible en la solución suelo, y ocurre principalmente por la difusión del P a la resina de igual forma que lo que sucede con las raíces. Al ser una resina de intercambio aniónico, extrae el P en forma de fosfatos de la solución suelo

(Chacón Torres, 2014), y esto se conecta directamente con que este reservorio se relaciona con el P fracción inorgánica.

Por otro lado, se encontró que los reservorios metodológicos “P (D)CB” y “P NaOH”, se encuentran relacionados con el reservorio estructural “P asociado a óxidos” y tienen un enfoque ecológico, en donde “P NaOH” se relaciona con el “P moderadamente biodisponible”, debido a que se extraen formas de P orgánico e inorgánico que se encuentran retenidas por quimisorción en componentes de Fe y Al de las superficies del suelo, es decir, extrae P fuertemente unido a óxidos (Hedley y col., 1982; Espinosa, 2004); mientras que el “P (D)CB” se conecta con el “P no biodisponible”, debido a que el citrato bicarbonato de sodio extrae las formas de P adsorbidas no extraíbles con NaOH (es decir, con mayor grado de irreversibilidad), y ditionito citrato bicarbonato extrae formas de P ocluido dentro de los óxidos de Fe (Barberis y col., 1996), esto nos indica que extrae formas que no se encuentran fácilmente disponibles.

Otros reservorios metodológicos que se relacionan con el “P no biodisponible” son el “P us-NaOH” y “P extracción residuo”, debido a que extraen formas de P que se encuentran unidas al suelo y son relativamente inertes, por lo que no participan fácilmente en las transformaciones de P (Agbenin & Tiessen 1995), por ello no se encuentran disponibles para la biota. Además, el “P HCl” también se relaciona con el “P no disponible”, sin embargo, en su categoría estructural se relaciona con el “P asociado a formas de Ca” porque extrae formas más estables de P_i debido a la baja solubilidad que presentan las apatitas asociadas a minerales primarios (Hedley y col., 1982; Costa y col., 2016; Recena Garrido, 2013). Asimismo, debido a que el HCl extrae P mineral se puede explicar la relación de “P HCl” con el reservorio de “P fracción inorgánica”.

En el artículo de Cross & Schlesinger (1995), se puede comprobar que las relaciones mencionadas con anterioridad, entre la categoría metodológica y la estructural, las han

aplicado variados investigadores independiente del tipo de suelo estudiado. Esto es debido a que los reservorios metodológicos mencionados permiten extraer información sobre la composición estructural del suelo, asumiendo que las asociaciones entre ambos se cumplen (p.ej. bajo contenido de “P HCl” permite inferir un bajo contenido de “P asociado a Ca”).

Cabe destacar que los artículos que estudiaron las formas específicas de P de la categoría analítica, se relacionaron principalmente con el reservorio de “P NaOH”. Esto debido a que la composición de P del suelo se puede determinar usando espectroscopía de resonancia magnética nuclear (RMN) ^{31}P en solución. Para esto se necesita un extractante, y se utiliza usualmente NaOH con EDTA debido a que recupera más P del suelo en comparación con el NaOH solo (Turner y col., 2003; Vestergren y col., 2012).

El “P hidrólisis enzimática” es otro reservorio metodológico que se relaciona con las formas específicas de la categoría analítica, principalmente con formas de P_o , debido a que la hidrólisis depende de la composición del P_o en suelos (reservorios analíticos). Por ejemplo, Sun y col. (2017) usan la fosfatasa alcalina de la mucosa intestinal bovina porque hidroliza completamente los P condensados (p.ej. adenosín trifosfato (ATP), adenosín difosfato (ADP)) y monoésteres de P (p.ej. adenosín monofosfato (AMP), glucosa-6-fosfato), mientras que la enzima fitasa puede degradar diésteres de P y monoéster inositol hexakisfosfato (Sun y col., 2017; Almeida y col., 2018).

Además, este reservorio de “P hidrólisis enzimática” se relaciona con el reservorio ecológico “P biodisponible” debido a que la hidrólisis representa a la mineralización (Sun y col., 2019) y, por lo tanto, es un mecanismo importante para aumentar la labilidad del P del suelo. Algunos autores utilizan la fosfatasa alcalina para estudiar la labilidad desde especies orgánicas comunes, p.ej. ATP y glucosa-6-fosfato (Sun y col., 2017 y 2019), mientras que otro artículo usa la fitasa para estudiar la labilidad desde el P_o recalcitrante,

considerado un mecanismo menos recurrente, pero relevante en ecosistemas con proliferación microbiana favorable, elevado contenido de materia orgánica y sin técnicas de arado (Almeida, 2018).

Sobre las formas específicas de Po, se encontró que el “P fosfato monoéster” fue una de las más estudiadas (11%, Tabla 9), lo que probablemente se debe a que son uno de los compuestos de Po con mayor relevancia en el ciclo biológico del P. Estos compuestos se caracterizan por enlaces entre C y fosfato ($-C-O-PO_3$) y algunas de sus formas específicas son el ácido fítico (myo-inositolhexakisfosfato), glucosa-6-fosfato, p-nitrofenil-fosfato, nucleótidos de DNA y de RNA (Siegmund, 2009).

Por otro lado, el ortofosfato fue una de las formas específicas de Pi más estudiadas (9,4%, Tabla 9) debido a que el P en la solución suelo se encuentra principalmente como ortofosfato, además es absorbido por las plantas mayormente de esta forma (Munera-Velez & Sepúlveda 2012).

Enfocándose en el “P microbiano”, todos los autores lo relacionaron con el reservorio metodológico de “P fumigación-extracción”. Sin embargo, Tamburini y col. (2012) también lo conectaron con el reservorio analítico “P fracción inorgánica”. Esto puede ser contraproducente por el hecho de que el P microbiano constituye a una porción importante de Po presente en los suelos (Pineda, 2014). La relación que hacen los autores con el enfoque analítico es debido a que los microorganismos, absorben Pi del suelo inmovilizándolo en su interior, e inducen a la liberación de este para contrarrestar la limitación de P en el suelo, convirtiéndolo en una fuente potencial de Pi.

El “P microbiano” es de categoría estructural, y en este trabajo se consideró a los microorganismos como estructura orgánica. Por otro lado, en términos analíticos, se cuantifican las formas de P, independiente de su origen estructural, por lo que no se consideró la vinculación con el “P microbiano”. Esto indica que, en general, es difícil

conectar reservorios estructurales y analíticos, y que esta última categoría debe ser interpretada con cuidado, dependiendo del método utilizado para extraer las formas de P que se cuantifiquen.

Finalmente, hubo dos artículos, Piotrowska-Długosz & Wilczewski (2020) y Yevdokimov y col. (2016), que conectaron el reservorio de “P microbiano” con el “P moderadamente biodisponible”, debido a su fácil liberación de nutrientes (Jenkinson, 1966).

El reservorio metodológico “P *batch*” solo se encontró en el 13% de los artículos (Tabla 2). Dentro de este, el 67% de los artículos que poseen este reservorio se encuentran relacionados con estudios de ciclos de congelación-descongelación debido a que estos ciclos perturban el ciclo del P en suelos, producto de los cambios fisicoquímicos y biológicos, influyendo en las capacidades de adsorción y desorción de P (Fitzhugh y col., 2001; Wang y col., 2017). Algunos autores, como Fan y col. (2014), mencionan que la capacidad de adsorción del P será menor en un suelo que haya pasado por ciclos de congelación-descongelación, en donde una posible explicación de esto es que después de estos ciclos el pH aumenta, provocando con ello un aumento de las cargas negativas en la superficie de los minerales arcillosos, los óxidos hidratados y la materia orgánica, lo que disminuye la adsorción de fosfatos; además, esto promueve la liberación de P adsorbido, aumentando el riesgo de pérdida de P por lixiviación.

Los autores que estudiaron los ciclos de congelación-descongelación en conjunto con el reservorio de “P *batch*”, lo hacen para comprender el dinamismo del P en suelos que, durante las estaciones frías y la congelación de los suelos, sufren perturbación de la porosidad, el contenido de humedad y la estabilidad de los suelos, lo que hace que el P sea vulnerable a la lixiviación, y con ello provocando eutrofización. Además, mencionan que estos estudios son relevantes para analizar cómo estos ciclos afectan la

productividad agrícola del suelo, y cómo actuarán los suelos al utilizar aplicaciones de P (p.ej. fertilización) (Özgül y col., 2012; Fan y col., 2014; Yevdokimov y col., 2016; Wang y col., 2017).

El “P *batch*” es el único reservorio metodológico que se relaciona con los reservorios mecanísticos “P adsorbido” y “P desorbido”, que no tienen una descripción estructural, ecológica ni analítica, debido a que se estudia el reservorio desde el proceso y no desde el origen, y por ello se desconoce dónde se adsorbe o desde dónde se desorbe el P. Además, al usar una especie de P conocida en condiciones ideales, se desconoce qué especie de P está adsorbida o puede desorberse naturalmente, impidiendo estimar la reversibilidad del proceso y, por lo tanto, la labilidad. Sin embargo, si los autores fraccionaran el suelo (p.ej. extraer y aislar materia orgánica, ciertos minerales, etc.) podría estudiarse la adsorción por componente, lo que daría una idea del impacto “estructural” en la adsorción.

A pesar de no incluir reservorios con enfoque ecológico, el “P adsorbido”, dependiendo de la magnitud y energía de adsorción, puede ser considerado un regulador de la biodisponibilidad de P ya que reduce la biodisponibilidad de P y ralentiza la liberación de P hacia la solución suelo. Por el contrario, el “P desorbido”, resolubiliza el P que se encuentra retenido reversiblemente por el suelo (Ahmed y col., 2021). Finalmente, el no incluir reservorios de enfoque analítico es debido a la metodología de medición del “P *batch*” utilizada, la cual no se enfoca en un tipo de P específico, aunque se podría atribuir a las formas de P que se adsorben o desorben, dependiendo del tipo de suelo estudiado (Sparks, 1986).

4.3.2. Tendencias detectadas

Con respecto a los objetivos de cada uno de los artículos estudiados, se encontró dos grandes grupos: el objetivo agrícola y el fundamental. Estos dos grupos de objetivos poseen subdivisiones (Figura 7). Las subdivisiones más estudiadas de los objetivos fundamentales fueron el estudio del efecto de factores biológicos y el estudio de efecto de propiedades fisicoquímicas del suelo en el ciclo de P. Sin embargo, solo tres artículos poseen estos dos objetivos juntos, y es importante que los estudios sean interdisciplinarios debido a que los factores biológicos pueden desencadenar cambios drásticos en las propiedades físicas y químicas del suelo y viceversa (Orozco Corral y col., 2016), cuya explicación se deduce únicamente desde el estudio de la interacción entre aspectos físicos, químicos y biológicos, influyendo directamente en las interpretaciones y propuestas de los autores para abordar un comportamiento y predecir o aplicar conocimiento en temas ambientales relevantes, como funciones ecosistémicas, restauración, entre otros.

Por otro lado, de entre los artículos que poseen objetivos del grupo agrícola, la subdivisión más estudiada es la aplicación de enmiendas orgánica y/o fertilizantes, lo cual está estrechamente relacionado a cómo aumentar la producción agrícola con estas aplicaciones. Un ejemplo de esto es el trabajo de Solaiman y col. (2019), quienes estudian el efecto del *biochar* en los suelos y cómo este contribuye en el crecimiento y nutrición de las plantas.

La mayoría de los reservorios de entrada se relacionan con objetivos agrícolas, principalmente formas de P fertilizantes o aplicaciones de P, porque los artículos que estudian estos reservorios se enfocan principalmente en conocer y entender cómo es que las aplicaciones de P afectan la dinámica de este nutriente dentro del suelo, y si esto contribuye en la productividad agrícola usando cultivos de referencia.

Los otros reservorios se encuentran en tan solo un 17% de los artículos (Tabla 7), y principalmente son formas de P de hojarasca o residuos. Estos reservorios no se encuentran dentro del sistema del suelo, pero a mayor escala temporal podrían volverse un reservorio de entrada debido a que la descomposición de la hojarasca y su conversión en humus dependen de factores como la productividad primaria, la composición y la estructura de la vegetación, los flujos de viento y agua, la temperatura y la humedad en el ambiente, la fertilidad del suelo, la actividad de los microorganismos y la fauna edáfica, así como de la inclinación del terreno y su exposición respecto al tránsito del sol (Gaspar-Santos y col., 2015). Esto garantiza el adecuado funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos en el suelo, como lo es el ciclo del P, y con ello favorece condiciones físicas, químicas y biológicas de los suelos (Del Valle-Arango, 2003).

Sobre la información registrada de la contextualización, se obtuvo un porcentaje mayor al 50% en todos los aspectos, con excepción de la escala temporal (Tabla 13). En todos los trabajos se informa la escala espacial. Asimismo, en la mayoría de los trabajos, la información del clima, taxonomía del suelo y los tipos de organismos encontrados, complementan la información que se registró para los ecosistemas estudiados, a pesar de que no se encontró un criterio concreto para describir cada categoría en literatura, es decir, la taxonomía del suelo se basa en diferentes clasificaciones, el clima se describe con diferentes características tales como precipitación y temperatura anuales, etc.

Esto es importante ya que la interpretación de los datos analíticos obtenidos en una investigación se basa principalmente en el análisis de antecedentes que contextualizan el entorno del estudio (Bernier, 2000). Un ejemplo de esto es que ciertos factores abióticos, como el clima, cambios estacionales, el pH, la temperatura y la humedad del suelo, entre otros, tienen un impacto en las comunidades microbianas del suelo

(Drenosky y col., 2010). Estos microorganismos son esenciales dentro del ciclo del P, ya que participan en reacciones metabólicas y constituyen las fuerzas motrices del suministro de energía y nutrientes (Paolini, 2018).

La presencia de agroecosistemas tiene una relación directa con los objetivos agrícolas de los autores, esto es debido a que consisten en ecosistemas de producción primaria gestionados por los seres humanos para su aprovechamiento, por medio de la adaptación, modificación, e interacción con los recursos naturales en la producción de alimentos y servicios que requiere la sociedad (Platas-Rosado y col., 2017), lo cual está íntimamente relacionado con la agricultura.

Ahora bien, se encontró que el reservorio de “P biodisponible” se relaciona con los estudios de agroecosistemas, es decir, que es probable que se cuantifique este reservorio cuando se estudia este ecosistema. Esto se debe a que el estudio del ciclo del P en suelos en estos ecosistemas se basa principalmente en la nutrición y crecimiento de los cultivos y/o vegetación a través del P biodisponible, vital en todos los procesos de transferencia de energía entre sistemas (Mixquititla & Torres 2016).

De los 22 artículos que mencionan la escala temporal, el 72% de los casos son estudios a largo plazo, mientras que los artículos que no hacen referencia a su escala temporal desarrollan experimentos relativamente cortos, que pueden durar solo horas o días. Esto podría indicar que los autores consideran relevante mencionar la escala temporal de sus estudios solo cuando son a largo plazo, debido a que lo utilizan como una variable de análisis. Un ejemplo de esto es el trabajo de Ma y col. (2020), quienes estudiaron el efecto de las aplicaciones de estiércol de corral a largo plazo (1966 a 2018) sobre la acumulación del P y la dinámica del ciclo del P.

Finalmente, el 30% de los artículos estudian procesos (Figura 9). Entre ellos, la mineralización, que consiste en la descomposición de la materia orgánica para generar

fosfatos en solución (Munera-Velez & Sepúlveda 2012), fue el proceso que más se estudió en la literatura, probablemente porque es fundamental para la contribución de la dinámica del P en suelos y es la fuente principal de P biodisponible (Rincón & Gutiérrez 2012), encontrándose una relación con el reservorio ecológico “P biodisponible” en el 77% de los artículos que estudian el proceso.

4.3.3. Sesgos probables

Los reservorios externos al sistema suelo, como lo son el reservorio de entrada, de salida y otros, se encontraron en menos de la mitad de los artículos. Esto puede deberse a que no son relevantes para los autores en sus estudios, debido a que estos se centran en los reservorios internos, y cómo afectan al ciclo del P en los suelos. También puede deberse a la dificultad que presentan los estudios de los reservorios externos de P (p.ej. en un ecosistema natural, la hojarasca es reservorio interno (se convierte en materia orgánica) o es reservorio externo (otros) dependiendo de la escala temporal) y su relevancia aparece en contextos particulares, p.ej. agrícola (adiciones periódicas de P), contaminación difusa (conducente a eutrofización) y otras perturbaciones antrópicas.

Referente a la información registrada en la contextualización, se encontró que los ecosistemas más estudiados son el “Ecosistema forestal” y el “Agroecosistema” (78% del total de artículos, Figura 8), lo cual indica que falta una mayor diversidad ecosistémica en el estudio del ciclo del P, y esto es relevante porque dependiendo del ecosistema, el P en el suelo actuará diferente. Los ecosistemas poseen un clima distinto, y este puede afectar potencialmente la disponibilidad de P del suelo a través de una variedad de procesos directos e indirectos (p.ej. la precipitación puede conducir directamente a la lixiviación del P del suelo). Además, puede afectar a la biodisponibilidad de P a través de las formas de P del suelo, propiedades fisicoquímicas y actividad microbiana (Hou y

col., 2018). Dependiendo del ecosistema existirán distintos organismos en el suelo y su crecimiento, la duración de su ciclo de vida y la actividad que desarrollen depende del tipo de suelo, de su fuente de energía (p.ej. materia orgánica) y de las condiciones climáticas. Los organismos en el suelo contribuyen a la regulación de propiedades físicas, químicas y biológicas (p.ej. propician condiciones para que sucedan procesos que mejoran la aireación, circulación de agua, nutrientes y que se generen condiciones que favorecen el establecimiento y productividad de las plantas), además su presencia o ausencia es un indicio de la calidad y salud del suelo (Correa y col., 2002).

Existe un notorio déficit de la información de procesos, lo cual se puede observar en la Figura 9. Esta información representa uno de los principales sesgos dentro del estudio del ciclo del P en suelos, debido a que los ciclos biogeoquímicos son sistemas dinámicos, de cuyos mecanismos de transformación depende la disponibilidad de estos elementos para diferentes formas de vida (Rincón & Gutiérrez 2012).

En este trabajo, se encontró que el primer enfoque experimental, que estudia los reservorios y procesos, fue el más utilizado para los estudios del ciclo del P en suelos (Figura 5), sin embargo, los procesos son asumidos en base a referencias de otros autores. Al estudiar solo los reservorios, se está omitiendo el dinamismo del ciclo, y así una parte de la distribución del P en el sistema, lo que implica que no se tendrá el conocimiento de cómo este variará en el tiempo, de cómo se relaciona con distintos componentes del suelo, ni cómo se podría regular dependiendo de los objetivos de cada estudio (p.ej. para cambio de uso de suelo, servicios ecosistémicos, conservación o generación de conocimiento).

En ninguno de los artículos analizados se estudió el proceso de precipitación. Este proceso se refiere a la retención no adsorptiva de formas de P con sales minerales. En suelos alcalinos precipita en forma de fosfatos de calcio, mientras que en suelos ácidos

lo hace como fosfato de hierro o de aluminio y esta precipitación genera P insoluble (Fernández-Marcos, 2011). Pocos autores estudian este proceso, siendo más común en artículos con enfoque geológico, usualmente en conjunto con estudios de adsorción, para estudiar la retención del P en el suelo (Carreira y col., 2006; Tunesi y col., 1999).

La información expuesta con anterioridad sugiere que los investigadores estudian procesos del ciclo del P en suelos en forma aislada o en conjunto con otros procesos que pueden estar relacionados, como la adsorción-precipitación (retención adsorptiva y no adsorptiva, respectivamente) y la mineralización-solubilización (p.ej. Liu y col., 2018). Asimismo, estos estudios pueden mencionar o no que son parte del ciclo del P en suelos, lo que demuestra que se pudo haber perdido información relevante para este trabajo debido a las palabras clave de la búsqueda bibliográfica.

La tendencia a parcelar el conocimiento puede conllevar a un sesgo, si es que se omiten: (i) reservorios y procesos relevantes dentro del estudio y su interpretación, (ii) supuestos y variables aplicadas en el contexto del estudio.

Esta información demuestra que si bien, se encontraron pocos artículos que estudiaban procesos dentro del ciclo del P en suelos, los que poseían estos estudios manifiestan precisión para los procesos estudiados, centrándose en estos, dejando de lado otras interacciones. Esto en comparación con la mayoría de los artículos que no estudiaron procesos (los asumieron), los cuales no abordaron el dinamismo del ciclo.

Con toda esta información expuesta, se propone que un adecuado estudio del ciclo del P en suelos debe considerar los diferentes compartimentos, sus múltiples interacciones, y los factores que intervienen, o bien, dar a conocer explícitamente las limitaciones o aproximaciones realizadas si el estudio es parcelado (p.ej. si se asume que hay reservorios estáticos, explicar por qué se asumió eso, en qué se basan para ello, etc.). Para esto también es importante presentar con claridad la escala espacial y

temporal en que se desarrollará el estudio. Debido a que el funcionamiento de los procesos depende de las escalas espacio-temporal, pues es útil en el contexto de delimitación del estudio (dar a conocer sus limitaciones y alcances), y ayudaría a entender aproximaciones, mejorando la capacidad para establecer interacciones (García, 2008). Por ejemplo, si la precipitación ocurre a escala geológica, mientras que la mineralización se produce a escala biológica, el proceso de mineralización será relevante en un estudio a corto plazo, mientras que la precipitación no.

Asimismo, se espera que en un futuro existan estudios del ciclo del P en el suelo que abarquen una mayor diversidad de ecosistemas, para así generar un conocimiento más amplio de la dinámica de este elemento y de sus respectivos cambios, producto de los factores externos que podrían influir en él. Además, presentar con claridad la información que contextualiza el ecosistema, ya sea el clima de la zona, características del suelo y tipos de organismos que puedan influir en el estudio. Con esto, se podría extender la comprensión del ciclo del P en suelos, abarcando no solo los reservorios y procesos involucrados, sino también el impacto de las diversas variables mencionadas que podrían estar actuando como reguladores en este ciclo.

4.3.4. Vinculación entre brechas de conocimiento detectadas

Se encontró que la falta de información conlleva a una falta de relaciones entre las categorías de reservorios. Es decir, se detectó que no todos los autores conectan los reservorios estudiados con distintas categorías, lo que se puede deber a que no presentan información suficiente para conectarlos, o que no es de su interés analizar estos reservorios dentro de otra categoría. Un ejemplo de esto es el trabajo de Xu y col. (2020) que conectaron el reservorio metodológico "P HCl" con los reservorios "P asociado a formas de Ca" (estructural) y "P fracción inorgánica (analítico); en cambio,

Friesen y col. (1997) cuantificó el mismo reservorio de "P HCl", pero no lo conectó con ninguna otra categoría de reservorio.

Asimismo, la falta de información también conlleva a relaciones inciertas (p.ej. conectar "P Olsen" con "P NaHCO₃" sin corroborar sus similitudes experimentales, o un mismo reservorio entre artículos), generalizaciones a partir de ideas particulares (p.ej. asumir que "P ocluido" = "P no biodisponible" cuando solo es una posible explicación), y la no detección de relaciones importantes para la comprensión del sistema (p.ej. si el "P Olsen" contenía Po, pero no se cuantificó la hidrólisis, así que lo desconocemos, repercutiendo en la interpretación).

Se detectó menor información acerca de los reservorios mecanísticos debido a los escasos de estudios de los procesos del ciclo del P, al ser esta una categoría que se encuentra estrechamente relacionada con los procesos.

La falta de información de la contextualización, en particular la información acerca de la taxonomía del suelo, o caracterización del suelo, puede implicar interpretaciones erradas sobre las asociaciones entre reservorios, especialmente aquellas asociaciones que dependen de la composición mineralógica, cantidad y composición de la materia orgánica, y otras propiedades fisicoquímicas, como lo son las asociaciones entre categorías metodológicas y estructurales.

Referente a la brecha consensual, se encontró que, antes de realizar el análisis de conceptos, solo dos trabajos conectaban el reservorio estructural "P microbiano" con reservorios ecológicos. Piotrowska-Długosz & Wilczewski (2020) relacionaron este reservorio con el "P lábil", y Yevdokimov y col. (2016) lo relacionaron con el "P insoluble", en ambos trabajos los autores afirmaron esto en base a referencias. Sin embargo, en el "P microbiano", las células microbianas son capaces de almacenar cantidades significativas de P gracias al proceso de inmovilización. Los mecanismos que controlan

la proliferación y muerte de microorganismos pueden permitir la liberación de P almacenado en la biomasa hacia la solución del suelo (García & Morón 1992). Por la fácil liberación de nutrientes, la biomasa microbiana se considera una fracción de “P moderadamente biodisponible”, y se encuentra controlada por factores ambientales (Jenkinson, 1966). Con esta información, reinterpretemos la información en la matriz analizada (<https://figshare.com/s/f41bad8b22984d4051b1>).

Los trabajos mencionados anteriormente tienen una contradicción aparente al relacionar el “P microbiano” con distintos términos contenidos en la categoría ecológica, sin embargo, estos autores se referían a lo mismo, aunque no manifestaron con claridad la información. Es importante destacar esto debido a que una falta de información entregada en los artículos generará un sesgo de conocimiento en los lectores. Más aún, si se utilizan artículos como estos de referencia, los que contienen falta de información en la descripción de reservorios u otro tipo de falta de información, podría conllevar a que futuros estudios generen un conocimiento sesgado, con interpretaciones personales, surgidas de la duda de lo que los autores quisieron decir, o de asumir que todos hablan exactamente de lo mismo cuando no necesariamente es así.

Entonces, es necesario enfatizar que este nivel de análisis no se hubiera logrado sin la propuesta conceptual, debido a que fue de gran ayuda para comprender y organizar la información de los diferentes trabajos analizados, y así poder detectar las distintas brechas de conocimiento, sus vinculaciones e implicancias, dentro de los estudios del ciclo del P en suelos.

4.4. Proyecciones

4.4.1. Limitaciones y sugerencias para futuras investigaciones

Las limitaciones de la revisión sistemática surgen de la diferencia entre la idea original de cómo se abordaría el ciclo del P en suelos y cómo se aborda realmente, ya que se propusieron criterios que posiblemente descartan información útil (Figura 4). Esto se puede demostrar en las palabras claves de la búsqueda, las que no abarcan los artículos que estudian solo una parte del ciclo del P en suelos o que no incluyen explícitamente en el estudio la palabra “ciclo”, por consiguiente, estos casos no aparecieron en la búsqueda. Sin embargo, este tipo de limitaciones se basan principalmente en que en este estudio se abordó el ciclo del P completo en suelos, sin parcelarlo.

Esta limitación repercute en el análisis de conceptos y en la representatividad de la propuesta conceptual, debido a que, si bien se considera una gran cantidad de información, podría presentar sesgos por falta de artículos analizados, sobre todo en aquellos casos donde se detectó poca información total (p.ej. procesos).

A pesar de las limitaciones, este trabajo representa una aproximación general de cómo se estudia en literatura el ciclo del P en suelos, y demuestra las principales brechas de conocimiento, por lo que los resultados de este trabajo pueden actuar como guía para futuras investigaciones, considerándolo como base para (i) aplicar mejora continua sobre lo realizado, en función de limitaciones detectadas y sugerencias propuestas que deriven en nuevo conocimiento más específico, y (ii) llevar a cabo la generación de conocimiento de forma estructurada, minimizando brechas consensuales y de información, para que se logre una aproximación con menor incertidumbre y más inclusiva, generando una mayor representatividad de la literatura.

Por lo tanto, para complementar este estudio, primeramente, se deben incluir otros motores de búsqueda, tales como Scopus y ScieLo. Asimismo, se deben tener en consideración las palabras claves de la búsqueda, esto variará dependiendo de los intereses de los investigadores, debido a que, si el interés es en una sección concreta del ciclo del P, se puede hacer la búsqueda sin incluir la palabra “ciclo” e incluso incorporar nombres alternativos de reservorios propuestos en este trabajo. Esto debido a que la propuesta conceptual y la vinculación entre reservorios ayudaría a los investigadores a usar definiciones precisas y considerar otros reservorios o procesos que pudieran afectar a la sección del ciclo del P de interés de los investigadores. Por ejemplo, si a un/a investigador/a le interesa estudiar la adsorción como regulador de la disponibilidad de P, podría considerar también desorción, precipitación, “P moderadamente biodisponible” o “P NaOH”, relacionados con la reversibilidad del proceso de adsorción (especies débilmente adsorbidas).

Todo esto es útil para la inclusión de aspectos más específicos dentro del ciclo del P, como variables que regulan procesos. Si hay pocos procesos descritos en literatura, es difícil entender el impacto de variables climáticas, ecosistémicas, biológicas, geológicas y fisicoquímicas, ya que no son totalmente representadas por las categorías de la contextualización, como lo son el clima, ecosistema, taxonomía y escala espacio-temporal, pues no suelen conectarse con el ciclo del P en los artículos.

Este trabajo también posee limitaciones asociadas al conocimiento científico, las cuales se detectaron al realizar la propuesta conceptual, y se refieren principalmente a que los autores no siempre definen de manera correcta o explícita los reservorios analizados, además de la falta de información que se encontró en estos estudios.

Por ello, se recomienda que las futuras investigaciones del ciclo del P en suelos, estudien los reservorios de P, en conjunto con el o los procesos que se encuentren

involucrados, para así no solo estudiar los reservorios en un momento específico, sino que, también la dinámica en la que están insertos. Para esto, es esencial describir y/o definir de manera clara y ordenada, los conceptos involucrados y la metodología que se utilizará dentro del estudio. Además, si el estudio a realizar es parcelado, será necesario dar a conocer explícitamente las limitaciones o aproximaciones que se realizarán.

Sobre la contextualización de los estudios, se recomienda exponer la información acerca del ecosistema, y que, para una mayor generación de conocimiento, se estudien diferentes ecosistemas, no solo ecosistemas forestales y agroecosistemas. Esto ayudaría a determinar reguladores y/o indicadores dentro del ciclo del P y, con ello, mayor capacidad de controlar el ciclo del P y mitigar el impacto ambiental en agricultura, planes de reforestación, etc.

Se debe exponer la taxonomía del suelo, aunque actualmente esta no cuenta con un criterio unificado debido a que existen diferentes taxonomías a lo largo del mundo (Reyes, 2014), se propone que se mencione la taxonomía en conjunto a las principales características del suelo estudiado (p.ej. textura, pH, densidad, etc.), y con ello, también mencionar los organismos que se encuentran en el suelo. Asimismo, la falta de unificación también sucede en la información sobre el clima, por lo que se propone que se mencionen las principales características de este, como lo son la temperatura, precipitaciones, humedad, entre otros. Para esto también es importante presentar la escala espacial y temporal en que se desarrollará el estudio, ya que es útil para delimitar el estudio y entender las aproximaciones (García, 2008).

Finalmente, se sugiere que los estudios sean interdisciplinarios para tomar en consideración los factores físicos, químicos y biológicos, que permiten abordar reguladores e indicadores, y también evaluar qué reservorios y procesos son más o

menos relevantes; por ejemplo, la composición del suelo se relaciona con reservorios estructurales, el pH con procesos de adsorción, precipitación, mineralización, etc.

4.4.2. Aplicación de la propuesta conceptual en estudios futuros

Los resultados presentados en este trabajo contribuyeron a la creación de diagramas de ciclos del P en el suelo, de elaboración propia, basados en la propuesta conceptual y la vinculación entre reservorios, considerando las diferentes categorías de reservorios que han sido propuestas. Estos esquemas representan la conexión de reservorios dentro del ciclo del P, en otras palabras, representan una guía para la comprensión del ciclo. De esta forma, se puede brindar una guía a los investigadores interesados en el ciclo del P de cómo abordar sus estudios dependiendo de sus objetivos.

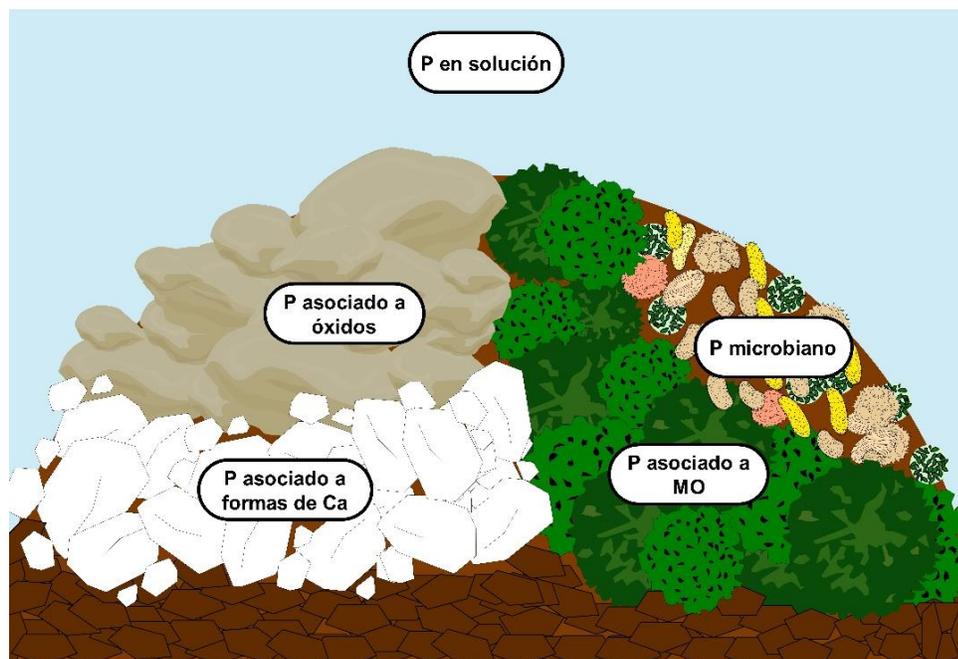


Figura 10. Reservorios estructurales involucrados en el ciclo del P en suelos.

El esquema de la Figura 10 representa una partícula de suelo disuelta (coloide) o formando parte de una estructura (ped), de cualquier tamaño (arena, limo, arcilla), con

composición orgánica e inorgánica representativa de los hallazgos de la literatura, en contacto con la solución suelo. Además, la figura muestra de forma general las diversas estructuras en donde se puede encontrar el P en el suelo, es decir, en materia orgánica, asociado a formas de Ca, asociado a óxidos, microorganismos, y solución del suelo.

En este esquema no se representó “P coloides en solución”, debido a que este reservorio se distingue por aplicar los reservorios metodológicos específicamente en la fracción coloidal, pero la interpretación y composición de dicha fracción es equivalente a la de cualquier partícula de suelo.

Ahora bien, en la Figura 11 se presenta el esquema del ciclo del P en suelos referente a los reservorios metodológicos. Cada reservorio se encuentra representado en la zona desde donde extrae las formas de P.

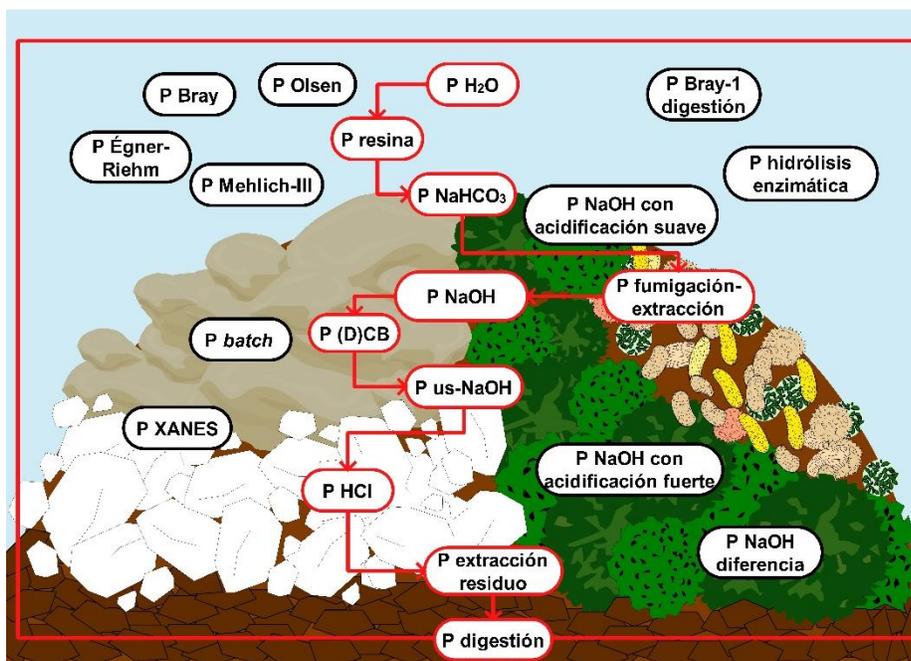


Figura 11. Reservorios metodológicos involucrados en el ciclo del P en suelos.

Los reservorios de color rojo derivan de la metodología de extracción secuencial relacionada con el método de Hedley (Tabla 1), y las flechas indican el orden de

extracción que usualmente se utiliza, siendo el último el “P digestión”, que puede extraer las formas de P en distintas estructuras, por lo que el recuadro es una aproximación de lo que puede extraer. Estas metodologías también pueden ser utilizadas sin una secuencia, es decir individualizadas.

Los reservorios de color negro son metodologías derivadas de distintos métodos de cuantificación de P, que no están relacionadas con el método de extracción secuencial de Hedley (Tabla 2).

Cabe destacar que, en la literatura analizada, no se encontró una relación entre el “P *batch*”, con alguna categoría estructural; sin embargo, se puede observar en la Figura 11 que se relacionó con formas de P asociadas a óxidos. Esto es debido a que entre los componentes del suelo que afectan la adsorción de P, los óxidos son el adsorbente principal, a pesar de que existen minerales de Ca (Subramaniam & Singh 1997).

Los minerales de Ca solamente son relevantes en la adsorción de P en suelos jóvenes (Sato y col., 2009), o con adiciones recientes de Ca exógeno (Wang y col., 2021), debido a que el Ca es menos estable, se solubiliza, y se vuelve más importante para la precipitación y menos para la adsorción. Por ello es desplazada por la adsorción en óxidos de Fe en suelos desarrollados (con mayor antigüedad), debido a la mayor estabilidad mineral del Fe a escala geológica en comparación con el Ca (Sato y col., 2009).

Asimismo, tampoco se relacionó el “P extracción-residuo” con algún reservorio de categoría estructural, sino que se representó como residuo en general (composición del suelo posterior a todas las extracciones previas).

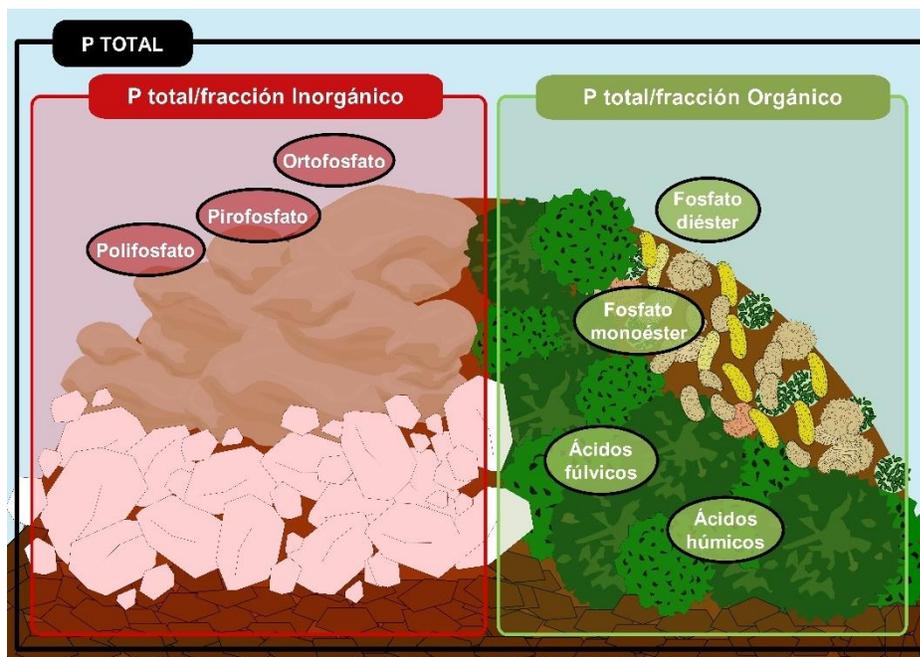


Figura 12. Reservorios analíticos involucrados en el ciclo del P en suelos.

En la Figura 12 se muestran los reservorios analíticos, y como se puede observar, el “P total” representa a todo el P que se encuentra en el suelo, y contiene a las demás formas de P, que son el P_o y el P_i. Dentro de estos tipos de P en el suelo, se encuentran representados con óvalos, las formas de P más específicas.

Si bien, las formas específicas de P_o propuestas desde los hallazgos en literatura son un total de ocho (Tabla 5), en la Figura 12 solo se muestran cuatro, debido a que el “Fosfato de inositol”, “Fosfato de myo-inositol” y “P DNA”, son subconjuntos del “Fosfato monoéster”, caracterizados por enlaces entre C y fosfato (-C-O-PO₃). Por otro lado, los “Fosfolípidos” son un subconjunto del “Fosfato diéster”, que se caracterizan por enlaces entre dos C y un fosfato (-C-O-PO₂-O-C-) (Fuentes Siegmund, 2009).

Si bien en este estudio se solo propusieron tres reservorios de la categoría mecanística desde los hallazgos en literatura, para generar un esquema sobre esta categoría se recurrió a información externa, tal y como se muestra la Figura 13.

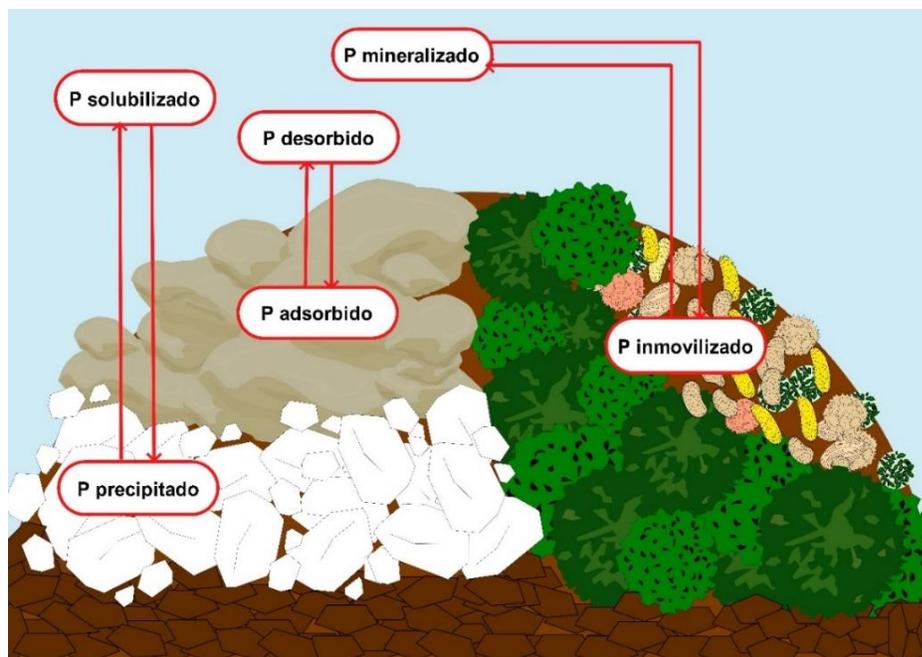


Figura 13. Reservorios mecánicos involucrados en el ciclo del P en suelos.

Se tomó en consideración que los principales procesos del ciclo del P son: disolución, precipitación, adsorción, desorción, y los procesos de mineralización e inmovilización, estos dos últimos se producen por la conversión entre las formas de P inorgánicas y orgánicas (Sims & Pierzynski 2005).

Con esta información, se propusieron los reservorios mecánicos de: “P solubilizado”, “P precipitado”, “P mineralizado” y “P inmovilizado”. Si bien en la literatura analizada se encontró el “P hidrolizado”, este reservorio es una forma específica de expresar el “P mineralizado”.

Los reservorios de “P desorción”, “P solubilización” y “P mineralización” son equivalentes, ya que los tres son reservorios que se encuentran en la solución del suelo, biodisponibles para la biota. Sin embargo, en esta categorización se encuentran separadas, debido a que para la biota es relevante dónde se encuentra el P en el suelo, y así promover diferentes mecanismos de liberación. Lo que indica que el “P solubilizado”

es un reservorio de P que se encuentra en solución y que proviene del P que se está asociado a formas de Ca. El “P desorbido”, también es un reservorio de P que se encuentra en solución, pero este proviene principalmente del P asociado a óxido. Asimismo, el “P mineralizado” es un tipo de reservorio de P que se encuentra en solución, pero que proviene de las formas de Po del suelo, tales como formas asociadas a materia orgánica y microbianas, principalmente por hidrólisis enzimática.

Finalmente, en la Figura 14, se muestra el esquema del ciclo de P contextualizado con la categoría ecológica, en donde se muestran los tres grandes reservorios propuestos desde los hallazgos en literatura.

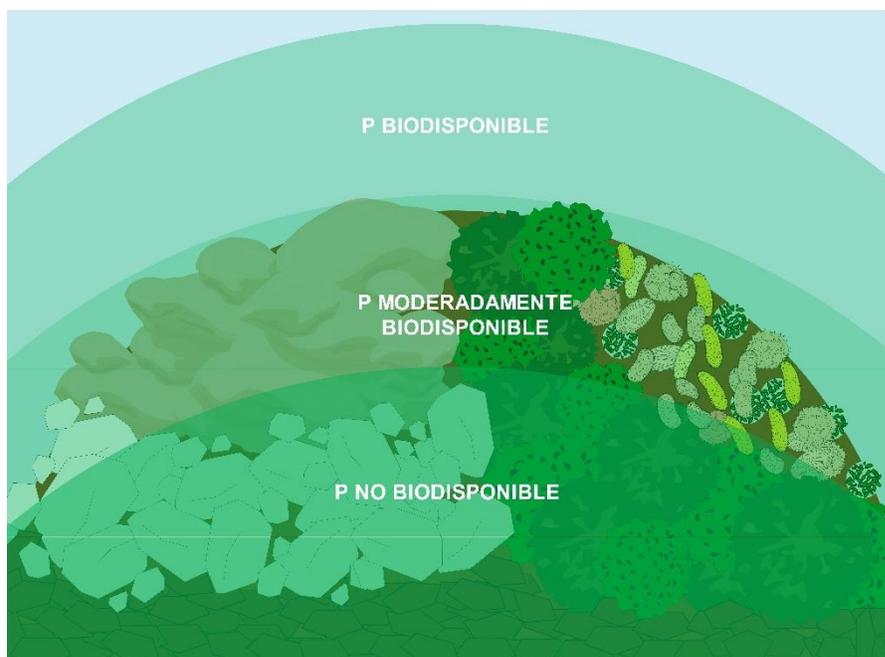


Figura 14. Reservorios ecológicos involucrados en el ciclo del P en suelos.

Los esquemas presentados en esta sección muestran relaciones entre reservorios de una misma categoría (p.ej. “P *batch*” y “P NaOH” involucran a óxidos), mientras que la superposición entre figuras muestra relaciones entre reservorios de diferente categoría (p.ej. “P asociado a óxidos” y “P asociado a formas de Ca” son inorgánicos).

Cabe destacar que hay una gran dificultad para vincular directamente los reservorios de la categoría estructural con los reservorios de la categoría analítica, debido a que todo dependerá del extractante que se utiliza.

Todo esto sirve de ayuda para aplicar en futuros trabajos, particularmente, para minimizar las brechas consensuales. Al utilizar estos esquemas, se debe tener un objetivo de estudio, y vincular este objetivo con alguna categoría de reservorio. Luego, se debe conectar con los reservorios metodológicos, evaluando su aplicación en el contexto del trabajo, y finalmente conectar con otros reservorios relacionados al tema de interés.

Estos esquemas pueden mejorarse con futuras investigaciones, incorporando reguladores e indicadores que, con mayor precisión, permitan conectar categorías de reservorio, ecosistema, clima, taxonomía y escala espacio-temporal con variables que afecten al ciclo del P (principalmente procesos).

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrollaron los objetivos propuestos, respondiendo a las preguntas de investigación planteadas, logrando presentar una propuesta conceptual sobre el ciclo del P en suelos, con información sobre reservorios, procesos y contextualización de cada uno de los artículos incluidos en la revisión.

A través del análisis de la literatura realizado, se encontró que existe más información acerca de reservorios internos del suelo, en comparación con los procesos. Además, se demostró que existen tres enfoques generales para estudiar el ciclo del P en suelos, pero usualmente los autores se centran en estudiar los reservorios, asumiendo la presencia de un proceso.

La propuesta conceptual sirvió para unificar los conceptos y también permitió que se clasificaran los reservorios internos del suelo en cinco categorías relacionables entre sí, en base a los distintos enfoques de los autores, con información sobre su definición, su matriz y su uso, obteniéndose los siguientes reservorios: metodológico, mecanístico, estructural, ecológico y analítico.

Se detectó una brecha de conocimiento por falta de información en los artículos revisados, principalmente sobre: (i) procesos, (ii) reservorio mecanísticos, (iii) escala espacial, y (iv) heterogeneidad de ecosistemas. Esto implica que los estudios del ciclo del P en suelos no se centran en el dinamismo del P, y esto se relaciona con la escasez de reservorios mecanísticos encontrados en la literatura. Además, se detectaron estudios en distintos ecosistemas, pero hubo preferencias en cuanto a las categorías de “Agroecosistema” y “Ecosistema forestal”, implicando que falta información para otros ecosistemas, que pueden complementar estos estudios, y así conocer la dinámica del P, con sus respectivos regulares e indicadores ante diferentes escenarios.

Además, se encontró una brecha consensual, la cual se vincula principalmente a la falta de consenso de los autores al describir los reservorios internos del suelo. Se detectó una discrepancia conceptual dentro de los estudios del ciclo del P en suelos, por lo que fue necesario el análisis de conceptos para esclarecer los distintos términos que se encontraron y así no generar sesgos.

Finalmente, este trabajo sirve como base para futuras investigaciones, en particular meta-análisis sobre el ciclo del P en los suelos, o incluso estudios que aborden esta temática de manera parcial. Esto debido a que los autores tendrán como base la propuesta conceptual para implementar palabras clave en la búsqueda, sus definiciones y comparar artículos. Además, podrán considerar las brechas de conocimiento encontradas, y así evitar sesgos relacionados con estas.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Agbenin, J. O., & Tiessen, H. 1995. Phosphorus forms in particle-size fractions of a toposequence from northeast Brazil. *Soil Science Society of America Journal*. **59(6)**: 1687-1693.
- Ahmed, W., Jing, H., Kailou, L., Ali, S., Tianfu, H., Geng, S., Jin, C., Qaswar, M., Jiangxue, D., Mahmood, S., Maitlo, A. A., Khan, Z. H., Zhang, H. & Chen, D. Y. 2021. Impacts of long-term inorganic and organic fertilization on phosphorus adsorption and desorption characteristics in red paddies in southern China. *Plos one*. **16(1)**: 1-16.
- Almeida, D. S., Menezes-Blackburn, D., Turner, B. L., Wearing, C., Haygarth, P. M., & Rosolem, C. A. 2018. Urochloa ruziziensis cover crop increases the cycling of soil inositol phosphates. *Biology and Fertility of Soils*. **54(8)**: 935-947.
- Andersohn, C. 1996. Phosphate cycles in energy crop systems with emphasis on the availability of different phosphate fractions in the soil. *Plant and soil*. **184(1)**: 11-21.
- Andersson, H., Bergström, L., Ulén, B., Djodjic, F., & Kirchmann, H. 2015. The role of subsoil as a source or sink for phosphorus leaching. *Journal of Environmental Quality*. **44(2)**: 535-544.
- Barberis, E., Marsan, F. A., Scalenghe, R., Lammers, A., Schwertmann, U., Edwards, A. C., Maguire, R., Wilson, M.J., Delgado, A. & Torrent, J. 1995. European soils overfertilized with phosphorus: Part 1. Basic properties. *Fertilizer research*. **45(3)**: 199-207.
- Beck, M. A., & Elsenbeer, H. 1999. Biogeochemical cycles of soil phosphorus in southern Alpine spodosols. *Geoderma*. **91(3-4)**: 249-260.
- Bernier, R. 2000. Diagnóstico de la fertilidad del suelo. *Técnicas de diagnóstico de fertilidad del suelo, fertilización de praderas, cultivos y mejoramiento de praderas*. Bernier, R., & Bortolameolli, G. (eds.). pp: 1-15. Serie Actas-Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Bezdicsek, D. F., Papendick, R. I., & Lal, R. 1997. Introduction: Importance of soil quality to health and sustainable land management. *Methods for assessing soil quality*. **49**: 1-8.
- Bowman, R. A., & Cole, C. V. 1978. Transformations of organic phosphorus substrates in soils as evaluated by NaHCO₃ extraction. *Soil science* **125(1)**: 49-54.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. 1999. Soil organic matter. En *The nature and properties of soils*. 5^{ta} edición. pp: 446-490. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Bray, R. H., & Kurtz, L. T. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil science*. **59(1)**: 39-46.

- Bünemann, E. K., Augstburger, S., & Frossard, E. 2016. Dominance of either physicochemical or biological phosphorus cycling processes in temperate forest soils of contrasting phosphate availability. *Soil Biology and Biochemistry*. **101**: 85-95.
- Carreira, J. A., Vinegla, B., & Lajtha, K. 2006. Secondary CaCO₃ and precipitation of P–Ca compounds control the retention of soil P in arid ecosystems. *Journal of Arid Environments*. **64(3)**: 460-473.
- Celi, L., Cerli, C., Turner, B. L., Santoni, S., & Bonifacio, E. 2013. Biogeochemical cycling of soil phosphorus during natural revegetation of *Pinus sylvestris* on disused sand quarries in Northwestern Russia. *Plant and soil*. **367(1)**: 121-134.
- Chacón Torres, L. C. 2014. Evaluación de la resina de intercambio aniónico como solución extractora para la determinación de fósforo disponible en suelos cafetaleros de la región central de Guatemala; diagnóstico y servicios ejecutados en el Laboratorio de Suelos, de La Asociación Nacional del Café (ANACAFÉ), Guatemala, CA. *Tesis Doctoral. Universidad de San Carlos de Guatemala*.
- Childers, D. L., Corman, J., Edwards, M., & Elser, J. J. 2011. Sustainability challenges of phosphorus and food: solutions from closing the human phosphorus cycle. *Bioscience*. **61(2)**: 117-124.
- Colwell, J. D. 1963. The estimation of the phosphorus fertilizer requirements of wheat in southern New South Wales by soil analysis. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. **3(10)**: 190-197.
- Compton, J. E., & Cole, D. W. 1998. Phosphorus cycling and soil P fractions in Douglas-fir and red alder stands. *Forest Ecology and Management*. **110(1-3)**: 101-112.
- Condon, L. M., Moir, J. O., Tiessen, H., & Stewart, J. W. B. 1990. Critical evaluation of methods for determining total organic phosphorus in tropical soils. *Soil Science Society of America Journal*. **54(5)**: 1261-1266.
- Correa, C. R. B., López, E. D. G., & de Prager, M. S. 2002. El suelo: los organismos que lo habitan. pp 5-10. En *Cuadernos Ambientales N° 5*. de Prager, M. S. (eds.). Instituto de Estudios Ambientales-IDEA, Colombia.
- Costa, M. G., Gama-Rodríguez, A. C., Gonçalves, J. L. D. M., Gama-Rodrigues, E. F., Sales, M. V. D. S., & Aleixo, S. 2016. Labile and non-labile fractions of phosphorus and its transformations in soil under eucalyptus plantations, Brazil. *Forests*. **7(1)**: 1-15.
- Cross, A. F., & Schlesinger, W. H. 1995. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma*. **64(3-4)**: 197-214.
- Crowley, K. F., & Bedford, B. L. 2011. Mosses influence phosphorus cycling in rich fens by driving redox conditions in shallow soils. *Oecologia* **167(1)**: 253-264.
- Dai, Z., Liu, G., Chen, H., Chen, C., Wang, J., Ai, S., Ai, S., Wei, D., Li, D., Ma, B., Tang, C., Brookes, F. & Xu, J. 2020. Long-term nutrient inputs shift soil microbial

- functional profiles of phosphorus cycling in diverse agroecosystems. *The ISME journal*. **14(3)**: 757-770.
- Degioanni, A., Bricchi, E., & Hampp, E. 2008. La energía en la formación de los suelos: aspectos teóricos y metodológicos para su evaluación. *Ciencia del suelo*. **26(1)**: 81-88
- Del Valle-Arango, J. I. 2003. Descomposición de la hojarasca fina en bosques pantanosos del Pacífico colombiano. *Interciencia*. **28(3)**: 148-153.
- Drenovsky, R. E., Steenwerth, K. L., Jackson, L. E., & Scow, K. M. 2010. Land use and climatic factors structure regional patterns in soil microbial communities. *Global Ecology and Biogeography*. **19(1)**: 27-39.
- Dynarski, K. A., Pett-Ridge, J. C., & Perakis, S. S. 2020. Decadal-scale decoupling of soil phosphorus and molybdenum cycles by temperate nitrogen-fixing trees. *Biogeochemistry*. **149**: 355-371.
- Égner, H., Riehm, H., & Domingo, W. R. 1960. Investigations of the chemical soil analysis as a basis for the evaluation of nutrient status in soil. II. Chemical extraction methods for phosphorus and potassium determination. *K Lantbruks Högsk Ann*. **26**: 199-215.
- Enrich-Prast, A., Gaxiola, A., Lúcia, A., Durán, J., Rodríguez, A. & Marotta, H. 2018. Ciclos biogeoquímicos y cambios globales. En Marquet, P.A., Valladares, F., Magro, S., Gaxiola, A. & Enrich-Prast, A. (eds). Cambio Global Una mirada desde Iberoamérica. Madrid, España.
- Espinosa, J. 2004. Fijación de fósforo en suelos derivados de ceniza volcánica. *Revistas de Recursos Naturales de Chile, CIREN*.
- Esteve, P., & Jaén, M. 2013. El papel de los ciclos biogeoquímicos en el estudio de los problemas ambientales en Educación Secundaria. *Investigación en la escuela*. **80**: 77-88.
- Fan, H., Huang, D., Zhou, L., & Jia, Y. 2014. Effects of freeze–thaw cycles on phosphorus adsorption and desorption in the black soil of northeastern China. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*. **64(1)**: 24-32.
- Fernández Marcos, M. 1997. Evaluación en cámara de crecimiento de tres métodos de determinación de fósforo asimilable en suelos no calcáreos. *Boletín de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelos*. **3-1**: 189-203.
- Fernández-Marcos, M. L. 2011. Contaminación por fósforo procedente de la fertilización orgánica de suelos agrícolas. *Gestión de residuos orgánicos de uso agrícola*. **Mayo**: 25-31.
- Filippelli, G. M. 2008. The global phosphorus cycle: past, present, and future. *Elements*. **4(2)**: 89-95.

- Fitzhugh, R. D., Driscoll, C. T., Groffman, P. M., Tierney, G. L., Fahey, T. J., & Hardy, J. P. 2001. Effects of soil freezing disturbance on soil solution nitrogen, phosphorus, and carbon chemistry in a northern hardwood ecosystem. *Biogeochemistry*. **56(2)**: 215-238.
- Friesen, D. K., Rao, I. M., Thomas, R. J., Oberson, A., & Sanz, J. I. 1997. Phosphorus acquisition and cycling in crop and pasture systems in low fertility tropical soils. *Plant and soil*. **196(2)**: 289-294.
- Frossard, E., Brossard, M., Hedley, M.J. & Metherell, A. 1995 Reactions Controlling the Cycling of P in Soils. En *Phosphorus in the Global Environment: Transfers, Cycles and Management*. Tiessen, H. (eds.). pp. 107-137. John Wiley & Sons, New York.
- Galili, I., & Lehavi, Y. 2006. Definitions of physical concepts: A study of physics teachers' knowledge and views. *International Journal of Science Education*. **28(5)**: 521-541.
- Gallardo, A., Covelo, F., Morillas, L. & Delgado, M. 2009. Ciclos de nutrientes y procesos edáficos en los ecosistemas terrestres: especificidades del caso mediterráneo y sus implicaciones para las relaciones suelo-planta. *Revista Ecosistemas*. **18(2)**: 4-19.
- Gao, X. L., Li, X. G., Zhao, L., & Kuzyakov, Y. 2019. Regulation of soil phosphorus cycling in grasslands by shrubs. *Soil Biology and Biochemistry*. **133**: 1-11.
- García, A., & Morón, A. 1992. Estudios de C, N y P en la biomasa microbiana del suelo en tres sistemas de rotación agrícola. *Revista INIA de Investigaciones Agronómicas*. **1(1)**: 111-126.
- García, D. 2008. El concepto de escala y su importancia en el análisis espacial. En *Introducción al análisis espacial de datos en ecología y ciencias ambientales: métodos y aplicaciones*. pp. 35-73. Servicio de Publicaciones.
- Gaspar-Santos, E. S., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N., & Álvarez-Solís, J. D. 2015. Acumulación y descomposición de hojarasca en bosques secundarios del sur de la Sierra Madre de Chiapas, México. *Bosque (Valdivia)*. **36(3)**: 467-480.
- Gross, A., & Angert, A. 2017. Use of ¹³C-and phosphate ¹⁸O-labeled substrate for studying phosphorus and carbon cycling in soils: a proof of concept. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. **31(11)**: 969-977.
- Guzmán Gómez, M. 2005. El fenómeno de la interdisciplinariedad en la ciencia de la información: contexto de aparición y posturas centrales. *Acimed*. **13(3)**: 1-1.
- Han, Y., Choi, B., & Chen, X. 2018. Adsorption and desorption of phosphorus in biochar-amended black soil as affected by freeze-thaw cycles in northeast China. *Sustainability*. **10(5)**: 1574.
- He, Z. L., Baligar, V. C., Martens, D. C., & Ritchey, K. D. 1997. Effect of phosphate rock, lime and cellulose on soil microbial biomass in acidic forest soil and its significance in carbon cycling. *Biology and fertility of soils*. **24(3)**: 329-334.

- Hedley, M. J., Stewart, J. W. B., & Chauhan, B. 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.
- Helfenstein, J., Tamburini, F., von Sperber, C., Massey, M. S., Pistocchi, C., Chadwick, O. A., Vitousek, P., Kretschmar, R. & Frossard, E. 2018. Combining spectroscopic and isotopic techniques gives a dynamic view of phosphorus cycling in soil. *Nature communications*. **9(1)**: 1-9.
- Heuck, C., Smolka, G., Whalen, E. D., Frey, S., Gundersen, P., Moldan, F., Fernandez, I., & Spohn, M. 2018. Effects of long-term nitrogen addition on phosphorus cycling in organic soil horizons of temperate forests. *Biogeochemistry*. **141(2)**: 167-181.
- Hou, E., Chen, C., Luo, Y., Zhou, G., Kuang, Y., Zhang, Y., Heenan, M., Lu, X. & Wen, D. 2018. Effects of climate on soil phosphorus cycle and availability in natural terrestrial ecosystems. *Global change biology*. **24(8)**: 3344-3356.
- Hinsinger, P. 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. *Plant and Soil*. **237(2)**:173-195.
- Hoppe, T., Kuokkanen, A., Mikkilä, M., Kahiluoto, H., Kuisma, M., Arentsen, M., & Linnanen, L. 2016. System merits or failures? Policies for transition to sustainable P and N systems in the Netherlands and Finland. *Sustainability*. **8(5)**: 463.
- Horta, M. D. C. S. M. 2005. La disponibilidad de fosforo evaluado por el método de Olsen en suelos ácidos de Portugal: significado agronómico y ambiental. Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba.
- Jenkinson, D. S. 1966. Studies on the decomposition of plant material in soil: II. Partial sterilization of soil and the soil biomass. *Journal of Soil Science*. **17(2)**: 280-302.
- Jeong, Y. S., K. Matsubae-Yokoyama, H. Kubo, J.-J. Pak, & T. Nagasaka. 2009. Substance flow analysis of phosphorus and manganese correlated with South Korean steel industry. *Resources Conservation and Recycling*. **53**: 479-489.
- Kaur, C., Selvakumar, G., & Ganeshamurthy, A, N. 2016. Organic Acids in the Rhizosphere: Their Role in Phosphate Dissolution. En *Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity*. Singh, D. P., Singh, H. B., & Prabha, R. (Eds.). pp. 165–177. Springer. New Delhi.
- Liu, J., Cai, K., Luo, S., Zhu, L., Zhang, J., & Yan, X. 2010. Soil phosphorous status and phosphorus cycling as influenced by soybean genotypes on an acidic low-phosphorus soil of southern China. *Communications in soil science and plant análisis*. **41(15)**: 1838-1849.
- Liu, J., Cade-Menun, B. J., Yang, J., Hu, Y., Liu, C. W., Tremblay, J., LaForge, K., Schellenberg, M., Hamel, C., & Bainard, L. D. 2018. Long-term land use affects phosphorus speciation and the composition of phosphorus cycling genes in agricultural soils. *Frontiers in microbiology*. **9**:1643.
- Ma, Q., Wen, Y., Ma, J., Macdonald, A., Hill, P. W., Chadwick, D. R., Wu, L., & Jones, D. L. 2020. Long-term farmyard manure application affects soil organic phosphorus

- cycling: A combined metagenomic and 33P/14C labelling study. *Soil Biology and Biochemistry*. **149**: 107959.
- MacDonald, G., Jarvie, H., Withers, P., Doody, D., Keeler, B., Haygarth, P., Johnson, L., Mcdowell, R., Miyittah, M., Powers, S., Sharpley, A., Shen, J., Smith, D., Weintraub, M., & Zhang, T. 2016. Guiding phosphorus stewardship for multiple ecosystem services. *Ecosystem Health and Sustainability*. **2**: 1-12.
- Maltais-Landry, G., Scow, K., & Brennan, E. 2014. Soil phosphorus mobilization in the rhizosphere of cover crops has little effect on phosphorus cycling in California agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*. **78**: 255-262.
- Marino, L. A., Carreri, R. A., & Alzugaray, G. E. 2008. Aportaciones para un abordaje interdisciplinar en la formación del ámbito de las ciencias. *Encuentros multidisciplinares*. **29**: 1-9.
- Mardamootoo, T., Kwong, K. N. K., & Du Preez, C. C. 2012. Evolution of the agronomic and environmental phosphorus status of soils in Mauritius after a seven-year sugarcane crop cycle. *Sugar Tech*. **14(3)**: 266-274.
- Mayer, V. J. 1995. Using the Earth System for Integrating the Science Curriculum. *Science Education*. **79 (4)**: 375-391.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in soil science and plant analysis*. **15(12)**: 1409-1416.
- Menon, R. G., Chien, S. H., & Hammond, L. L. 1990. Development and evaluation of the Pi soil test for plant-available phosphorus. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. **21(13-16)**: 1131-1150.
- Messiga, A. J., Ziadi, N., Morel, C., & Parent, L. E. 2010. Soil phosphorus availability in no-till versus conventional tillage following freezing and thawing cycles. *Canadian Journal of Soil Science*. **90(3)**: 419-428.
- Miller, A. P., & Arai, Y. 2017. Investigation of acid hydrolysis reactions of polyphosphates and phytic acid in Bray and Mehlich III extracting solutions. *Biology and Fertility of Soils*. **53(7)**: 737-742.
- Villegas-Torres, O. G. & Mixquititla-Casbis, G. 2016. Importancia de los fosfatos y fosfitos en la nutrición de cultivos. *Acta Agrícola y Pecuaria*. **2(3)**: 55-61.
- Mooshammer, M., Hofhansl, F., Frank, A. H., Wanek, W., Hämmerle, I., Leitner, S., Schneckler, J., Wild, B., Watzka, M., Keiblinger, K. M., Zechmeister-Boltenstern, S., & Richter, A. 2017. Decoupling of microbial carbon, nitrogen, and phosphorus cycling in response to extreme temperature events. *Science advances*. **3(5)**: 1-13
- Munera-Velez, G. A., & Meza Sepúlveda, D. C. 2012. El fósforo elemento indispensable para la vida vegetal. *Universidad Tecnológica de Pereira*.
- Murphy, J. A. M. E. S., & Riley, J. P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica chimica acta*. **27**: 31-36.

- Nuopponen, A. 2010. Methods of concept analysis-towards systematic concept analysis (part 2 of 3). *LSP Journal-Language for special purposes, professional communication, knowledge management and cognition*. **1(2)**: 5-14.
- Nuopponen, A. 2011. Methods of concept analysis-tools for systematic concept analysis (part 3 of 3). *LSP Journal-Language for special purposes, professional communication, knowledge management and cognition*. **2(1)**: 4-15.
- Oelkers, E. H., Valsami-Jones, E., & Roncal-Herrero, T. 2008. Phosphate mineral reactivity: from global cycles to sustainable development. *Mineralogical Magazine*. **72(1)**: 337-340.
- Olander, L. P., & Vitousek, P. M. 2004. Biological and geochemical sinks for phosphorus in soil from a wet tropical forest. *Ecosystems*. **7(4)**: 404-419.
- Olsen, S. R., Cole, C.V., Watanabe, F. S., & Dean, L. A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. United States Department of Agriculture in cooperation with the Colorado Agricultural Experiment Station. Circular No. 939. pp: 1-20.
- Orozco, M. 2017. Método de reglas de asociación para el análisis de afinidad entre objetos de tipo texto. Tesis Doctoral. Universidad de la Costa CUC.
- Orozco Corral, A. L., Valverde Flores, M. I., Martínez Téllez, R., Chávez Bustillos, C., & Benavides Hernández, R. 2016. Propiedades físicas, químicas y biológicas de un suelo con biofertilización cultivado con manzano. *Terra Latinoamericana*. **34(4)**: 441-456.
- Özgül, M., Günes, A., Esringü, A., & Turan, M. 2012. The effects of freeze-and-thaw cycles on phosphorus availability in highland soils in Turkey. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **175(6)**: 827-839.
- Paolini Gómez, J. E. 2018. Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. *Terra Latinoamericana*. **36(1)**: 13-22.
- Pierzynski, G., McDowell, R., & Sims, J. T. 2005. Chemistry, Cycling and Potential Movement of Inorganic P in Soils. En *Phosphorus: Agriculture and Environment*. Sims, J. T., Sharpley, A. N. pp. 53-86. American Society of Agronomy.
- Pineda, M. E. B. 2014. La solubilización de fosfatos como estrategia microbiana para promover el crecimiento vegetal. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*. **15(1)**: 101-113.
- Piotrowska-Długosz, A., & Wilczewski, E. 2020. Influence of field pea (*Pisum sativum* L.) as catch crop cultivated for green manure on soil phosphorus and P-cycling enzyme activity. *Archives of Agronomy and Soil Science*. **66(11)**: 1570-1582.
- Platas-Rosado, D. E., Vilaboa-Arroniz, J., González-Reynoso, L., Severino-Lendecky, V. H., López-Romero, G., & Vilaboa-Arroniz, I. 2017. Un análisis teórico para el estudio de los agroecosistemas. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. **20(3)**: 395-399.

- Recena Garrido, R. 2013. Estudio de la disponibilidad de fósforo para planta en suelos representativos de ámbito mediterráneo. *Tesis de Magister. Departamento de Ciencias Agroforestales de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica (ETSIA) de la Universidad de Sevilla.*
- Reyes, I. 2014. Una ojeada a la clasificación del suelo. *Contactos*. **91**: 30-40.
- Richter, D. D., Allen, H. L., Li, J., Markewitz, D., & Raikes, J. 2006. Bioavailability of slowly cycling soil phosphorus: major restructuring of soil P fractions over four decades in an aggrading forest. *Oecologia*. **150(2)**: 259-271.
- Rico, L., & Fernández-Cano, A. 2013. Análisis didáctico y metodología de investigación. En *Análisis Didáctico en Educación Matemática*. Rico, L., Lupiáñez, J. L., & Molina, M. (eds.). pp: 1-22.
- Rincón, L. E. C., & Gutiérrez, F. A. A. 2012. Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista colombiana de Biotecnología*. **14(1)**: 285-295.
- Rojas, C. 2006. Interpretación de la disponibilidad de fósforo en los suelos de Chile. *Serie Actas-Instituto de Investigaciones Agropecuarias*.
- Romero, F. 2009. Aprendizaje significativa y constructivismos. *Temas para la educación*. **3**.
- Ruttenberg, K. C. 2003. The global phosphorus cycle. En *Treatise on geochemistry*. Holland, H. D., & Turekian, K. K. pp: 543-643. Academic Press.
- Salas-Zapata, W. A., Ríos-Osorio, L. A., & Álvarez del Castillo, J. 2011. La ciencia emergente de la sustentabilidad: de la práctica científica hacia la constitución de una ciencia. *Interciencia*. **36(9)**: 699-706.
- Sato, S., Neves, E. G., Solomon, D., Liang, B., & Lehmann, J. 2009. Biogenic calcium phosphate transformation in soils over millennial time scales. *Journal of Soils and Sediments*. **9(3)**: 194-205.
- Schlesinger, W. H., & Andrews, J. A. 2000. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*. **48(1)**: 7-20.
- Shuman, L. M., Raymer, P. L., Day, J. L., & Cordonnier, M. J. 1988. Comparison of four phosphorus extraction methods on three acid southeastern soils. *Communications in soil science and plant análisis*. **19(5)**: 579-595.
- Siegenthaler, M. B., Tamburini, F., Frossard, E., Chadwick, O., Vitousek, P., Pistocchi, C., Mészáros, É. & Helfenstein, J. 2020. A dual isotopic (³²P and ¹⁸O) incubation study to disentangle mechanisms controlling phosphorus cycling in soils from a climatic gradient (Kohala, Hawaii). *Soil Biology and Biochemistry*. **149**: 107920.
- Siegmund, B. S. F. 2009. Evaluación de la disponibilidad de fósforo durante el proceso de degradación aerobia de la excreta de bovino y su aplicación en un suelo de origen volcánico. Tesis Doctoral. Universidad de la Frontera.

- Sims, J. Y., & Pierzynski, G. M. 2005. Chemistry of phosphorus in soils. En *Chemical processes in soils*. Tabatabai, M. A., Sparks, D. L., Al-Amoodi, L., & Dick, W. A. (eds.) pp. 151-192. Soil Science Society of America Inc.
- Smith, T. & Smith R. L. 2007. Ciclos Biogeoquímicos. En *Ecología* 6° edición. pp: 470-514. Pearson Educación, S.A, Madrid.
- Solaiman, Z. M., Abbott, L. K., & Murphy, D. V. 2019. Biochar phosphorus concentration dictates mycorrhizal colonisation, plant growth and soil phosphorus cycling. *Scientific reports*. **9(1)**: 1-11.
- Sparks, D. L. 1986. Kinetics of ionic reactions in clay minerals and soils. *Advances in Agronomy Sparks, D. L. (eds.)*. pp. 231-266. Department of Plant and Soil Science. University of Delaware. Newark, Delaware, USA.
- Stevenson, F. J. 1994. Organic matter in soils: pools, distribution, transformations, and functions. En *Humus chemistry*. 2° edition. pp 1-23. John Wiley & Sons, Inc.
- Stewart, J. W. B., & Tiessen, H. 1987. Dynamics of soil organic phosphorus. *Biogeochemistry*. **4(1)**: 41-60.
- Subramaniam, V., & Singh, B. R. 1996. Phosphorus supplying capacity of heavily fertilized soils I. Phosphorus adsorption characteristics and phosphorus fractionation. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. **47(2)**: 115-122.
- Sun, D., Bi, Q., Xu, H., Li, K., Liu, X., Zhu, J., Zhang, Q., Jin., C., Lu, L., & Lin, X. 2017. Degree of short-term drying before rewetting regulates the bicarbonate-extractable and enzymatically hydrolyzable soil phosphorus fractions. *Geoderma*. **305**: 136-143.
- Sun, D., Yang, X., Wang, C., Hao, X., Hong, J., & Lin, X. 2019. Dynamics of available and enzymatically hydrolysable soil phosphorus fractions during repeated freeze-thaw cycles. *Geoderma*. **345**: 1-4.
- Suñer, L., Martínez, J.M., Duval, M.E., López, F.M., Landriscini, M.R., & Galantini, J.A. 2018. Dinámica de las formas de fósforo en el suelo y su relación con la productividad del cultivo. *Siembra directa en el SO Bonaerense*. Galantini, J.A. (eds.) pp. 69-78.
- Tamburini, F., Pfahler, V., Bünemann, E. K., Guelland, K., Bernasconi, S. M., & Frossard, E. 2012. Oxygen isotopes unravel the role of microorganisms in phosphate cycling in soils. *Environmental science & technology*. **46(11)**: 5956-5962.
- Tapia, Y. & García, F. 2013. La disponibilidad del fósforo es producto de la actividad bacteriana en el suelo en ecosistemas oligotróficos: una revisión crítica. *Terra Latinoamericana*. **31(3)**: pp. 231-242.
- Tonello, M. S., Hebner, T. S., Sterner, R. W., Brovold, S., Tiecher, T., Bortoluzzi, E. C., & Merten, G. H. 2020. Geochemistry and mineralogy of southwestern Lake Superior sediments with an emphasis on phosphorus lability. *Journal of Soils and Sediments*. **20(2)**: 1060-1073.

- Trasar-Cepeda, M. C., De Blas, E., Garcia-Rodeja, I., Leirós, M. C., & Gil-Sotres, F. 1993. Modifications of the phosphorus cycle with development of lignite mine soils. *Land Degradation & Development*. **4(3)**: 131-142.
- Tunesi, S., Poggi, V., & Gessa, C. 1999. Phosphate adsorption and precipitation in calcareous soils: the role of calcium ions in solution and carbonate minerals. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. **53(3)**: 219-227.
- Turner, B. L., Bristow, A. W., & Haygarth, P. M. 2001. Rapid estimation of microbial biomass in grassland soils by ultra-violet absorbance. *Soil Biol. Biochem.* **33**: 913–919.
- Turner, B. L., Mahieu, N., & Condrón, L. M. 2003. The phosphorus composition of temperate pasture soils determined by NaOH–EDTA extraction and solution ³¹P NMR spectroscopy. *Organic Geochemistry*. **34(8)**: 1199-1210.
- Turner, B. L., & Newman, S. 2005. Phosphorus cycling in wetland soils: the importance of phosphate diesters. *Journal of environmental quality*. **34**:1921-1929.
- Undurraga, P. 1999. Conceptos de fertilidad fosfatada en suelos volcánicos. *Serie Actas - Instituto de Investigaciones Agropecuarias*. N°2.
- Vargas, M., Bertsch, F., & Cordero, A. 1992. Comparación de métodos de extracción de fósforo, potasio, calcio y magnesio disponible en Vertisoles de Guanacaste, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. **16(1)**: 115-123.
- Vestergren, J., Vincent, A. G., Jansson, M., Persson, P., Ilstedt, U., Gröbner, G., Giesler R., & Schleucher, J. 2012. High-resolution characterization of organic phosphorus in soil extracts using 2D 1H–³¹P NMR correlation spectroscopy. *Environmental Science & Technology*. **46(7)**: 3950-3956.
- Vincent, A. G., Turner, B. L., & Tanner, E. V. 2010. Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist forest. *European Journal of Soil Science*. **61(1)**: 48-57.
- Vitousek, P. M., & Howarth, R. W. 1991. Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur?. *Biogeochemistry*, **13(2)**: 87-115.
- Wanek, W., Zezula, D., Wasner, D., Mooshammer, M., & Prommer, J. 2019. A novel isotope pool dilution approach to quantify gross rates of key abiotic and biological processes in the soil phosphorus cycle. *Biogeosciences*. **16(15)**: 3047-3068.
- Wang, Q., Liu, J., & Wang, L. 2017. An experimental study on the effects of freeze–thaw cycles on phosphorus adsorption–desorption processes in brown soil. *RSC advances*. **7(59)**:37441-37446.
- Wang, L., Wang, J., & Wei, Y. 2021. Facile synthesis of eggshell biochar beads for superior aqueous phosphate adsorption with potential urine P-recovery. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. **622**: 126589.

- Whalen, J. K., & Chang, C. 2001. Phosphorus accumulation in cultivated soils from long-term annual applications of cattle feedlot manure. *Journal of environmental quality*. **30(1)**: 229-237
- Wood, T., Bormann, F. H., & Voigt, G. K. 1984. Phosphorus cycling in a northern hardwood forest: biological and chemical control. *Science*. **223(4634)**: 391-393.
- Xu, X., Mao, X., Van Zwieten, L., Niazi, N. K., Lu, K., Bolan, N. S., & Wang, H. 2020. Wetting-drying cycles during a rice-wheat crop rotation rapidly (im) mobilize recalcitrant soil phosphorus. *Journal of Soils and Sediments*. **20(11)**: 3921-3930.
- Yevdokimov, I., Larionova, A., & Blagodatskaya, E. 2016. Microbial immobilisation of phosphorus in soils exposed to drying-rewetting and freeze-thawing cycles. *Biology and Fertility of Soils*. **52(5)**: 685-696.

ANEXO

En las siguientes tablas, se presentan los nombres de literatura para cada uno de los reservorios de las distintas categorías, conjunto con el nombre que fue propuesto, y la información de cada reservorio.

Tabla A1. Nombres en literatura y propuestos de los reservorios metodológicos del ciclo del P en suelos.

NOMBRES DE LITERATURA	NOMBRE PROPUESTO	METODOLOGÍA DE CUANTIFICACIÓN DE P ASOCIADA A CADA RESERVORIO
<i>Reservorios derivados de la metodología secuencial de Hedley</i>		
<i>Water-extractable P water-extractable phosphate Soil water-extractable phosphorus (Pw) total water-soluble P Water extractable molybdate reactive P filtered through a cellulose membrane acetate and measured spectrophotometrical was analyzed on a ultraviolet/visible light spectrophotometer (uv/vis) using the molybdate colorimetric reaction difference between total water-soluble P and DIP calculated as the difference between TP and SRP</i>	P H ₂ O	Se extrae el P con agua ultrapura, con un procedimiento de centrifugación y filtrado. También se puede determinar directamente desde la solución suelo.
<i>Resin P Resin-extractable P resin extractable Pi anion exchange membrane (AEM) resin strips resin Pi (Teflon-based anion exchange resin strips saturated with HCO₃) resin Pi H₂O-P The anion exchange membrane (AEM) method developed by Shaw & DeForest (2013)</i>	P resina	Se extrae el P con resina de intercambio aniónico y agua, por 16h.
<i>extracted NaHCO₃ Sodium bicarbonate bicarbonate extractable P NaHCO₃ P Extracted with NaHCO₃ (Pi) NaHCO₃-Pi Extracted NaHCO₃ NaHCO₃-extractable Pi Bicarbonate Pi Pi extracted with NaHCO₃ Bicarbonate P NaHCO₃-Po NaHCO₃-extractable Po Bicarbonate Po Po extracted with NaHCO₃</i>	P NaHCO ₃	Se extrae el P con bicarbonato de sodio agitando la solución por 16h. Se deja reposar, luego se centrifuga y se filtra el sobrenadante para su posterior determinación.
<i>chloroform fumigation–extraction method Difference between resin P with fumigation and without fumigation Difference of extractable P in the fumigated soil Chloroform fumigation-extraction difference between hexanol fumigated and unfumigated samples extraction with liquid chloroform-enriched salt solutions the CHCl₃ fumigation method employing the AEM technique. In addition to CHCl₃, toluene was tested as a suitable</i>	P fumigación-extracción	La metodología de este reservorio posee dos pasos a seguir: 1. Fumigación con cloroformo (la mayoría) u otros solventes orgánicos (p.ej. hexanol, tolueno). A veces incluye salinización de la solución.

<i>fumigant difference between P extracted with hexanol and with only resin liquid hexanol fumigation and simultaneous extraction with anion exchange resin membranes subsamples were mixed with a chloroform/water mixture (fumigated soil) or with water (control unfumigated soil) amount of P extracted from the soil by the resin in the presence of hexanol minus the amount of P extracted from the soil without hexanol determined via an AEM hexanol fumigation-extraction procedure determined by the CHCl3-fumigation</i>		2. Cuantificación por diferencia entre extracción (con resina de intercambio aniónico o con agua) con y sin aplicación de la fumigación.
<i>P-DCB ditionito-citrato P citrate-dithionite-bicarbonato-Pi P-CB</i>	P (D)CB	Se extrae el P con una mezcla de citrato de sodio y bicarbonato de sodio (CB). Se puede agregar a la mezcla diotinito de sodio, para una mejor eficiencia extractiva (DCB).
<i>NaOH-EDTA P NaOH/EDTA extract Pi extracted NaOH-EDTA NaOH- EDTA NaOH-EDTA-Pi NaOH-EDTA-Po extract PO was calculated by difference (PO = total P -Pi) (extracted with NaOH/EDTA) The difference between the total P (extracted with NaOH/EDTA) and inorganic P of these NaOH-EDTA extracts is referred to as organic P The difference between total P (extracted with NaOH-EDTA) and oxides-Pi gives an estimate of the soil organic P content (Po) NaOH-Pi NaOH-P P-NaOH hydroxide Pi Pi extracted with NaOH Alkali P (or NaOH-P) NaOH-Po Soil NaOH-extractable Hydroxide Po Po extracted with NaOH extraction with 1M NaOH, and then the supernatant was extracted with 3.5M HCl</i>	P NaOH	Se añade NaOH al suelo y se agita por 16h, luego se centrifuga y se filtra el sobrenadante para su posterior determinación. Se puede agregar Na ₂ EDTA para una mejor eficiencia extractiva (NaOH/EDTA).
<i>Alkali ultrasonically extracted P (or NaOH-ultrasonic P) us-NaOH-Pi us-NaOH-Po</i>	P us-NaOH	Se añade NaOH al suelo, a una baja temperatura, y luego se somete a sonicación en un determinado tiempo y energía. Finalmente se añade más solución de NaOH y se agita por 16h. Luego se centrifuga y se filtra el sobrenadante para su posterior determinación.
<i>HCl-P HCl-Pi acid P HCl-extractable P HCl extractable Pi Pi extracted with HCl extraction with 1M NaOH, and then the residue was extracted with 1 M HCl HClhc</i>	P HCl	Se añade HCl al suelo y se agita por 16h, luego se centrifuga y se filtra el sobrenadante para su posterior determinación. Se puede utilizar HCl caliente, para mejorar la extracción.
<i>sum of the concentrations of Al-P, Fe-P, Ca-P and occluded-P, according to Hedley et al. 1982 supernatants were extracted to</i>	Pi extracciones	Se suman las concentraciones de Pi obtenidas en cada una de las extracciones.

determine inorganic P (Pi) (after using NaHCO₃, NaOH, HCl and centrifuge)

extracted with H₂SO₄/HNO₃ extraction | acid digestion (H₂SO₄-HClO₄) followed by colorimetric assessment of the digest | microwave-digested in a mixture of ultrapure nitric acid, hydrofluoric acid, and hydrochloric | digestion with H₂SO₄-HClO₄ | heat-digested using concentrated H₂SO₄-HClO₄ | Digested in sulfuric acid | H₂SO₄ extraction of ignited soils | HClO₄-H₂SO₄ mixture | digested in HNO₃-HClO₄ | digestion with potassium persulfate and sulfuric acid | digestion in concentrated nitric acid | sulphuric acid and hydrogen peroxide as oxidants | digestion with a mixture of acids consisting of H₂SO₄ and HClO₄ | ammonium persulfate and H₂SO₄ | digestion with H₂SO₄ and ammonium persulfate | digestion with HNO₃ | digestion with H₂SO₄ and H₂O₂ | H₂SO₄-P | digested with potassium persulfate and H₂SO₄ | determined by the sulfuric acid-perchloric acid decocing method | determined after H₂SO₄-HClO₄ digestion | ignition and acid extraction (H₂SO₄) | digestion with HClO₄ | Concentrated HNO₃ and HClO₄ digestion | ashing and digestion in HCl | extracted by persulfate digestion | by separate H₂SO₄/H₂O₂ digest of whole sample | determined with mixture of H₂SO₄, HF and HClO₄, and subsequent dissolution of the residue with HCl | extracted with HCl and the supernatant was separated from the residue by centrifugation | extracted H₂SO₄ | H₂SO₄-Pi | HCl-extractable P in unignited samples | ignition-extraction | difference between molybdate reactive-P and TP | difference between total soil P and total soil Pi (where the total P and the inorganic P were measured with an acid extraction in ignited soils) | OP= total P- IP (where the total P and the inorganic P were measured with an acid extraction in ignited soils) | OP= TP-IP (where the total P and the inorganic P were measured with an acid extraction in ignited soils) | was calculated from the difference between total P and SRP | calculated as the difference between total P and inorganic P (total inorganic P) | difference between total P inorganic and Total P | The residue was calcined and an extraction of ashes was performed to extract Organic Phosphorus (OP) using HCl

P digestión

La metodología consiste en una digestión con ácido. Se realiza mayormente con H₂SO₄ mezclado con otros ácidos (p.ej. HNO₃, HCl, HClO₄, HF) o con sales (persulfato de amonio o potasio) o con H₂O₂. También HNO₃ mezclado con otros ácidos (p.ej. HClO₄, HF, HCl), a veces asistido por microondas, u otros ácidos independientes, p.ej. HCl, HClO₄.

(Waterlot et al. 2018) | determined by the ignition method (It consists of the difference between the P of the ignited soil and the inorganic P of the unignited soil) | Organic P ($H_2SO_4-P_o$) was calculated as the difference between P extracted from ignited minus non-ignited samples ($H_2SO_4-P_i$) | calculated as the difference between the digested and undigested samples | was obtained by the difference between HCl-extractable P on ignited and unignited samples | organic P was calculated as the amount of P_i released in heated soils minus P_i released from unheated soils | H_2SO_4 digestion P

determined by the digestion of the soil residue with $H_2SO_4-H_2O_2$ at 360 °C | $LiBO_2$ was added to the dry soil, and mixed with precooked graphite crystals, finally heated in an oven at 1000 °C | Concentrated H_2SO_4 digestion at 360 °C | Residual P was defined as total P, as measured by X-ray fluorescence (XEPOS, Spectro, Kleve, Germany), minus the sum of Hedley pools. | was calculated by subtracting NaOH EDTA extractable phosphorus with total soil phosphorus, assuming calcium-bound phosphate in primary minerals (i.e., HCl extractable phosphorus) is negligible in heavily eroded soils as analyzed here | Residual P was calculated by subtracting the sum of NaOH P_i , plus NaCl P_i , NaOH P_o , citrate-dithionite bicarbonate (CDB) P_i , and HCl P_i from total soil P | Residual P (P_r) was calculated as the difference between P, and total extractable P (Pter the sum of the inorganic and organic P fractions obtained by sequential fractionation).

P extracción
residuo

Se extrae el residuo de P que queda después de las extracciones secuenciales con método de Hedley y col. (1982). A través de (i) la diferencia entre P digestión aplicado al suelo original y las fracciones de P extraído con la metodología secuencial de Hedley, o (ii) mediante el cálculo de P digestión en el residuo que queda posterior a todas las extracciones.

Reservorios derivados del método de extracción de formas de P biodisponibles

Olsen-P | was determined by using Na bicarbonate | Olsen extractable P | extracted $NaHCO_3$ (Colwell 1963) | bicarbonate extractable P

P Olsen

Corresponde a la extracción de P con $NaHCO_3$ 0,5N a pH 8,5 con una relación suelo: solución de 1:20 en un tiempo aproximado de 30 minutos, de acuerdo con el método de Olsen y col. (1954). Este método puede tener modificaciones de diversos autores, por ejemplo, Colwell (1963), en donde se utiliza una dilución de 1:100 en un tiempo de 16h. Esto es debido a que al estar más diluida la solución tiene menos interferencia de la materia orgánica.

<i>Bray-1 extracted with NH₄F and HCl Bray-1 phosphorus Bray-1 extractable P Bray-2 P</i>	P Bray	Corresponde a la extracción de P con NH ₄ F 0,03N y HCl 0,025N, con un tiempo de 1 minuto, de acuerdo con el método de Bray Kurtz (1945). Para P Bray-2 solo cambia la concentración del ácido a 0,1N y el tiempo de extracción que es 40 segundos, de acuerdo con el método de Bray Kurtz (1950). La relación suelo:solución para ambos casos es 1:7.
<i>Mehlich-P Mehlich-3-extractable phosphorus (PM3) Mehlich III-extractable P</i>	P Mehlich III	Corresponde a la extracción de P con CH ₃ COOH 0,2M, NH ₄ NO ₃ 0,25M, NH ₄ F 0,015M, HNO ₃ 0,013M y EDTA 0,001M a un pH de 2,5, de acuerdo con el método de Mehlich (1984).
<i>Ammonium lactate extraction (method of Egner-Riehm DL)</i>	P Égner-Riehm	Corresponde a la extracción de P con lactato de amonio 3,5M y ácido acético, a pH 3,75, con una relación suelo:solución de 1:20, a un tiempo de 120 minutos, de acuerdo con el método de Égner y col. (1960).
<i>L-OP= total P- AP</i>	P Bray-1 digestión	Corresponde a la extracción de P con el método de Bray-1, después de fumigar con CHCl ₃ y remover el CHCl ₃ residual. De la solución obtenida se toma una alícuota y se cuantifica P total (digestión ácida). Se toma otra alícuota y se cuantifica Pi (método Murphy y Riley). Finalmente, se restan ambos para la obtención del resultado.

Reservorios derivados de procesos

<i>The P adsorption was examined by dried soil in 30 mL of 0.01 mol·L⁻¹ KCl (pH = 7) 5.000g of each soil sample passed through a 2 mm nylon sieve were distributed among 10 centrifuge tubes and 50 ml KH₂PO₄ solution containing different amounts of P (0, 2, 4, 10, 20, 30, 40, 60, 80, and 100 mg L⁻¹) were added to each tube. The solutions were treated with a drop of chloroform to prevent bacterial growth. Soil suspensions were then shaken on a horizontal shaker for 24 h at 25 ± 1 °C Different concentrations of the MAP solution (0, 500, 1000, 1500, 2000, and 2500 mg/L) with and without β-CD (0.01 mol/L) were prepared. Then, the soil (5 mg) was placed in every sample (25 mL), respectively. All the samples were shaken by a shaker for 10 h at 25 °C determined by ³³P labelling individually for each of the tested soils in control</i>	P batch	Consiste en ensayos en donde se añaden distintas concentraciones de P al suelo y se agitan durante un tiempo hasta alcanzar el equilibrio químico, generalmente asumido en 24h. Después de los experimentos de adsorción se le agregan a la solución CaCl ₂ para desplazar el P adsorbido.
---	---------	---

treatment | calculated as the difference between the amount of P added and the amount of P remaining in the equilibrating solutions | calculated from the difference in the P added to the soils and the P present in the solution | The supernatants were examined to determine the desorbed P content | After the adsorption experiments, 50 ml of CaCl₂ solution (0.01 mol L⁻¹, pH 7.0) were added to displace adsorbed P. The soil suspensions were shaken for 1 h at (25 ± 1) °C in a constant temperature shaker, separated by centrifugation at 5000 rpm for 10 min, filtered through a 0.45 mm membrane filter, and then analyzed spectrophotometrically | The suspension of every sample, which corresponded to 1500, 2000, and 2500 mg/L of the initial MAP concentration, was centrifuged and removed. Then, the 25 mL CaCl₂ solution (0.01 mol/L) was placed in every sample, respectively. After shaking at 25 °C for 10 h in the shaker, every sample was centrifuged and filtered again | calculated as the amount of P remaining in the equilibrating solution | The equilibrium P concentration in the solution (i.e., desorbed P) was determined using an ICP. The amount of P retained by the soil (presorbed P) was determined by the difference between initial sorbed P and P in desorption equilibrium solution | Samples were then extracted with distilled water (1:20 w/w) for 5,40,60,90 and 120 minutes

Enzymatic hydrolysis was used to determine the labile Po of the soil, and more specifically, the fraction of hydrolyzable Po (Sun et al. 2017) | determined with active phytase + denatured phytase

P hidrólisis
enzimática

Consiste en la hidrólisis de Po hacia Pi mediante la adición de enzimas en dos pasos:

1. Adición de la enzima fosfatasa alcalina o fitasa en una muestra de suelo a pH óptimo, con incubación durante 16h.
2. Cuantificación por diferencia entre extracción de Pi con NaHCO₃ o NaOH/EDTA, con y sin aplicación de la enzima o con enzima activa y desnaturalizada. Además, algunos autores utilizan Na₃C₆H₅O₇*2H₂O para prevenir la adsorción del Pi producido por hidrólisis.

Reservorios derivados de otras extracciones		
H_2SO_4 -P	P H_2SO_4	Consiste en agitar suelo seco al aire con una solución de H_2SO_4 . Se centrifuga en un determinado tiempo y luego se filtra.
$CaCl_2$ -P	P $CaCl_2$	Consiste en agitar suelo seco al aire con una solución de $CaCl_2$. Después se debe centrifugar y filtrar.
<i>ML-OP: The sum of this IP and the above H_2SO_4-extracted OP</i>	P NaOH con acidificación suave	Consiste en agitar el suelo con H_2SO_4 1M por 3 h. De la solución, se cuantifica el P_i y el P total, y por diferencia se determina el P_o : $P_o(1) = P \text{ total} - P_i$ La muestra de suelo ya tratada se enjuaga con etanol (95%), y se seca al aire. Luego se añade NaOH 0,5M y se agita por 6h simulando una hidrólisis de P_o a P_i , para extraer P_o residual: $P_o(2) = P_i - NaOH$ Finalmente, se cuantifica P NaOH con acidificación suave a través de la suma de entre $P_o(1)$ y $P_o(2)$.
<i>MR-OP: The OP in the acidified filtrates was determined by the increase in the IP after the perchloric–sulphuric acid digestion</i>	P NaOH acidificación fuerte	Posterior a la extracción de P NaOH con acidificación suave, se acidificaron los extractos de NaOH a un rango de pH de 1,0 a 1,8 para precipitar el P en ácidos húmicos y solubilizar P en ácidos fúlvicos. Se dejan reposar y luego se filtran. Se determina de la diferencia de P_i y P total, cuantificados de la solución.
<i>HR-OP: The difference between the total P and the sum of IP and MR-OP in the NaOH extracts</i>	P NaOH diferencia	Previo a la cuantificación de P NaOH con acidificación fuerte, en las muestras básicas de NaOH se cuantifica P_i y P total (digestión en ácido perclórico). Este reservorio de P se determina mediante la diferencia entre P total, y la suma de P_i con P NaOH con acidificación fuerte.
Reservorios de cuantificación directa		
<i>bulk P K-edge XANES (Samples were homogenized, ground, and analyzed on Beamline 14-3 at the Stanford Synchrotron Radiation Lightsource (SSRL))</i>	P XANES	Las muestras se homogeneizaron, molieron y analizaron con espectroscopía de estructura fina de borde cercano de absorción de rayos X de borde K (XANES).

Tabla A2. Nombres en literatura y propuestos de los reservorios estructurales del ciclo del P en suelos.

NOMBRE DE LITERATURA	NOMBRE PROPUESTO	INFORMACIÓN/ REPRESENTACIÓN DE P
<i>Soil microbial biomass P microbial P Microbial biomass P microbial Pi</i>	P microbiano	P dentro del componente vivo de la materia orgánica del suelo.
<i>Soluble P Dissolved P Pi from the soil solution and Pi that is loosely sorbed on soil particle extracts substances that are sorbed onto soil particles and are readily exchanged with the soil solution soil solution P mineral P (bound to Fe and Al oxides) Iron and aluminum Pi oxide P oxides-Pi (which solubilizes Pi sorbed to Al and Fe oxides) associated with aluminum and iron oxides most closely associated with P that is adsorbed to Al (minor contribution) and Fe (major contribution) oxides in soil Al-P/Fe-P Fe/Al oxide-bound P secondary P minerals adsorbed on surfaces, precipitated as Fe and Al phosphates Fe/Al oxide associated Pi P fixed in aluminum (Al) and iron (Fe) hydroxides P bounded to amorphous Al sorbed to Al and Fe hydroxides and from Fe phosphates bound to Al, Fe and Ca²⁺ strongly bound by chemical sorption to iron and aluminium oxides of the soil surfaces P bound to iron, aluminum, and manganese oxyhydroxides Hematite-P (to represent Fe-P species) reductant-soluble P</i>	P en solución	P que se encuentra en la solución suelo. P asociado principalmente a óxidos de Fe y Al. En menor medida, se incluyen formas de P asociadas a Ca o Mn, dependiendo del tipo de suelo estudiado.
<i>Soil organic matter P P stored in stable organic matter may include Po associated with humic substances.</i>	P asociado a materia orgánica	P que se encuentra enlazado de manera estable a la materia orgánica del suelo.
<i>mineral P (Ca bound-P, apatite P) Ca bound-P Ca-P Ca-P minerals calcium bound P minerals poorly soluble calcium-phosphates such as primary hydroxyapatite and fluorapatite mineral Pi (represent Pi in Ca-P minerals such as apatite) Primary mineral Ca-phosphates Ca-associated Pi apatite P Pi bound to Ca on apatite-type minerals P bound to calcium Apatite (to represent the broader class of Ca-P species)</i>	P asociado a formas de Ca	P asociado a formas de Ca, sean minerales primarios (principalmente apatita) o secundarios (p.ej. derivados de la precipitación de sales en solución).
<i>colloidal P</i>	P coloides en solución	P asociado a los coloides del suelo. Se obtiene mediante un protocolo de sedimentación y centrifugación.

Tabla A3. Nombres en literatura y propuestos de los reservorios mecánicos del ciclo del P en suelos.

NOMBRE DE LITERATURA	NOMBRE PROPUESTO	DEFINICIÓN DEL RESERVORIO
<i>sorbed P P adsorption Adsorbed P (with and without β-CD) P sorption Adsorbed P adsorbed onto soil colloidal surfaces, including small amounts of microbial P saloid bound P</i>	P adsorbido	P que se adsorbe en las superficies del suelo.
<i>desorbed P P desorption desorbed P (with and without β-CD)</i>	P desorbido	P que se desorbe desde las superficies del suelo.

Tabla A4. Nombres en literatura y propuestos de los reservorios analíticos del ciclo del P en suelos.

NOMBRE DE LITERATURA	NOMBRE PROPUESTO	DEFINICIÓN DEL RESERVORIO
<i>Soil total P Total P Soil aggregate total P (TP) Total P content</i>	P total	P total (orgánico e inorgánico) que se encuentra en el suelo analizado.
<i>Total inorganic P inorganic P (IP) inorganic P inorganic P or soluble reactive P (which includes primarily free orthophosphate plus any polyphosphates and possibly some organic P degraded in the acid reaction) inorganic (Pi)</i>	P total inorgánico	P inorgánico total que se encuentra en el suelo analizado. Se determina por colorimetría, usualmente con el método de Murphy & Riley (1962).
<i>Total organic P (TOP, Po) total organic P organic P (OP) organic P Soil organic P the soluble unreactive P (SUP – the molybdate unreactive P, which is referred to in this paper as organic P – although it also includes the inorganic non-acid labile polyphosphates organic P (Po)</i>	P total orgánico	P orgánico total que se encuentra en el suelo analizado. Se obtiene mediante la diferencia entre el P total y el P inorgánico total o bien, entre Pi bajo distintas condiciones.
	P fracción total	Fracción de P total obtenido bajo alguna extracción realizada. Al provenir de una extracción, no representa al P total del suelo, sino que al P total extraído con cierto extractante. Usualmente es determinada con ICP-OES.
<i>Inorganic P inorganic phosphate inorganic predominately orthophosphate total inorganic inorganic P (Pi) Soil Pi inorganic Soil inorganic P Inorganic P dissolved inorganic P </i>	P fracción inorgánica	Fracción de P inorgánico presente en una extracción en particular. Se determina después de hacer precipitar la MO de la extracción.

<i>soluble reactive phosphorus (SRP) total non-apatite inorganic P total apatite inorganic P inorganic P (active P)</i>		Usualmente se determina con el método de Murphy & Riley (1962).
<i>Phosphate inorganic orthophosphate orthophosphate</i>	Pi: Ortofosfato	Son formas específicas de Pi. Para la determinación de estas formas, se pueden usar las siguientes técnicas sobre alguno de los reservorios metodológicos: ³¹ P RMN y HPLC.
<i>Pyrophosphate (inorganic)</i>	Pi: Pirofosfato	
<i>Polyphosphate (inorganic)</i>	Pi: Polifosfatos	
<i>Organic P dissolved organic P dissolved organic phosphorus (DOP) organic P forms</i>	P fracción orgánica	Fracción de P orgánico presente en una extracción en particular. Se determina por diferencia entre el P total y el inorgánico de la extracción.
<i>phosphate monoesters (organic) orthophosphate monoesters labile phosphate monoester</i>	Po: Fosfato monoéster	Son formas específicas de Po. Para la determinación de estas formas, se pueden usar las siguientes técnicas sobre alguno de los reservorios metodológicos: ³¹ P RMN y HPLC.
<i>orthophosphate diesters phosphate diester</i>	Po: Fosfato Diéster	
<i>Inositol phosphate (inorganic)</i>	Po: Fosfatos de inositol	
<i>Myo-inositol hexakisphosphate Phytase-like P phytase P</i>	Po: Fosfatos de myo-inositol	
<i>DNA (organic)</i>	Po: DNA	
<i>Phospholipids (organic)</i>	Po: Fosfolipidos	
<i>Fulvic acids</i>	Po: Ácidos fúlvicos	
<i>Humic acids</i>	Po: Ácidos Húmicos	

Tabla A5. Nombres en literatura y propuestos de los reservorios ecológicos del ciclo del P en suelos.

NOMBRE DE LITERATURA	NOMBRE PROPUESTO	DEFINICIÓN DEL RESERVORIO
<i>less reliable available P Plant-available P most labile P Available (for microbial uptake) Available pool (readily available inorganic soil P) soil available P available P Labile P (the most labile and biologically available) Labile P (Readily soluble and</i>	P biodisponible	P inmediatamente disponible para la biota.

<p><i>exchangeable Pi) labile P (plant-available P) labile P (available P) labile Pi fraction readily available P Labile P bioavailable inorganic P Labile P fraction available P Soil available P labile and weakly absorbed P available pool readily bioavailable phosphate less labile Labile, adsorbed Labile P (Readily mineralizable) labile P (plant-available P) labile P (available P) labile Pi fraction labile Po labile P (easily hydrolysable by phosphatase action) Soil bioavailable P Bioavailable soil P instantaneously 'available' phosphorus relatively bioavailable soil P phytase labile P labile</i></p>	P moderadamente biodisponible	P potencialmente disponible para la biota.
<p><i>Labile Pi and moderately labile Pi not considered directly plant-available Moderately labile P fraction less available P forms labile P less labile than the previous Slowly mineralizable labile Pi fraction labile Po reserve P moderately labile P moderately labile</i></p>	P moderadamente biodisponible	P potencialmente disponible para la biota.
<p><i>Insoluble P Sparingly labile P fraction Unavailable P Occluded-P non-labile less available P forms Not readily available to plants unavailable to organisms in the short term occluded non biologically cycling pool of P insoluble P (plant-unavailable P) P occluded unavailable P (inaccessible P) Sparingly labile P fraction (unavailable for plant uptake) unavailable to organisms on any biologically significant timescale moderately resistant highly resistant organic P</i></p>	P no biodisponible	P no disponible para la biota en la escala de tiempo del ciclo biológico del P.

Para los cálculos de *lift* se aplicó la ecuación (2), que se muestra a continuación:

$$Lift(X \Rightarrow Y) = \frac{\text{Soporte}(Y \text{ dado } X)}{\text{Soporte}(Y)}$$

Para ejemplificar, se calculó el *lift* para conocer la probabilidad de ocurrencia del P biodisponible, dado Agroecosistema. En donde de 18 artículos que poseen Agroecosistemas, 14 de ellos registraron estudiar P biodisponible, y la frecuencia de artículos en que se estudia el reservorio de P biodisponible es de 36/53, tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Lift(P \text{ biodisponible} \Rightarrow \text{Agroecosistema}) = \frac{14/18}{36/53} = 1,14$$

El resultado obtenido es mayor a 1, por lo que es más probable que se tengan Agroecosistemas cuando los artículos tengan un objetivo agrícola, con respecto al total de casos dentro de la matriz.

De la misma manera, se realizan los demás cálculos de *lift*, obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla A6. Resultados de los cálculos *lift* para cada probabilidad de ocurrencia propuesta.

Ocurrencia de Y dada una condición X	<i>lift</i>
P biodisponible → Agroecosistema	1,14
P biodisponible → Ecosistema forestal	0,90
Agroecosistemas → Objetivos Agrícolas	2,24
Reservorios ecológicos → Objetivos Agrícolas	1,08
P biodisponible → Objetivos Agrícolas	1,01
Reservorios de entrada → Objetivos Agrícolas	1,8