



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Dinámica del fósforo en el suelo y su relación con el crecimiento del *Eucalyptus grandis* para la región alto andina de Colombia**

**Claudia Marcela Zapata Duque**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad, Ciencias Agropecuarias  
Palmira, Colombia

2017

# **Dinámica del fósforo en el suelo y su relación con el crecimiento del *Eucalyptus grandis* para la región alto andina de Colombia**

**Claudia Marcela Zapata Duque**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Ph.D., Ciencias Agropecuarias**

Directores:

Ph.D. Néstor Miguel Riaño

Ph.D. María Sara Mejía de Tafur

Línea de Investigación:

Suelos y Aguas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad, Ciencias Agropecuarias

Palmira, Colombia

2017

*Dedicatoria*

*A mi madre,  
A mi esposo  
A mi hija, Sara.*

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mis agradecimientos en primera instancia a mi esposo, mi hija y mi madre por su paciencia y apoyo incondicional.

A la contribución generosa y económica de Smurfit Kappa, Colombia, en especial a Byron Urrego y todo el equipo de Investigación forestal, donde los técnicos con su grupo y la analista de datos, Liliana Perafan, estuvieron en cada momento con su valiosa colaboración. Al departamento técnico, en especial a los Ingenieros Juan Carlos Bastidas y Jorge Franco por la facilidad y apoyo en los análisis de suelo. Al estudiante en práctica Amauri Nicolas García por su responsabilidad y apoyo en los análisis de suelos.

A los Directores de la tesis Dr. Néstor Miguel Riaño Herrera y Dra. María Sara Mejía de Tafur, por su constante acompañamiento, asesoría y recomendaciones para que este trabajo fuera mejor.

A la Cooperativa de Producción Forestal, especialmente al Dr. Thomas Fox por su apoyo y colaboración. Finalmente a la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira y a Colciencias por las oportunidades brindadas.

## Resumen

En tres sitios localizados en la región alto andina de Colombia se establecieron experimentos en un diseño de parcelas divididas (la parcela principal correspondía al genotipo (2) y las sub parcelas a 9 dosis crecientes de fertilizante fosfatado) con el objetivo de estimar la dinámica del fósforo en el suelo y su relación con el crecimiento temprano del *Eucalyptus grandis*. Con la demanda creciente de madera, el *Eucalyptus* es una alternativa ambientalmente sostenible, económicamente rentable y técnicamente viable para proveer materias primas, generar empleo y reincorporar al sector productivo nacional suelos que otros usos encuentran poco productivos.

Los resultados mostraron diferencias entre la máxima capacidad de adsorción y amortiguadora entre suelos en la misma clasificación taxonómica (andisoles), y se encontró que el fósforo se encuentra principalmente en la en la fracción orgánica de estos suelos. El crecimiento temprano del *Eucalyptus grandis* respondió significativamente a la aplicación de fósforo en todos los sitios y materiales genéticos. Esto fue evidenciado en las diferencias en las tasas de crecimiento en altura y diámetro, con mayor concentración de árboles creciendo en categorías diamétricas superiores al aplicar el P y con diferencias en la acumulación y distribución de la biomasa en todos sus componentes y la repuesta en el área foliar. Finalmente fue posible correlacionar la respuesta relativa del crecimiento con el P extraído en el suelo por el método de Bray II y generar intervalos de confianza.

**Palabras clave:** *Eucalyptus grandis*, fósforo, crecimiento, biomasa, método Bray II.

**Abstract**

In three sites located in the high Andean region of Colombia, were established experiments in a split plot design (the main plot corresponded to the genotype (2) and the subplots to 9 increasing doses of phosphate fertilizer). The objective was to estimate the phosphorus dynamics in the soil and its relation with early growth of *Eucalyptus grandis*. This specie is a sustainable, profitable and technically viable alternative to provide the increasing demand of wood. This also generates employment and recovers soils that other crops find unproductive.

Results showed differences in phosphorus adsorption and buffer capacity between soils at the same taxonomic classification (andisols), although it was founded that phosphorus is mainly in organic fraction of this soils. In terms of growth, Eucalyptus plantations responded significantly to the application of P at establishment time in all sites and genetic materials. Moreover, as consequence, differences in growth rates, such as height, diameter and greater concentration of growing trees in larger diametric categories when the P was applied. Also, biomass' accumulation, distribution in all its components, and leaf area index responded positively. Finally, it was possible to correlate the relative growth response with the P extracted in the soil by the Bray II method and accomplish confidence intervals.

**Keywords:** *Eucalytus grandis*, phosphorus, growth, biomass, Bray II method.

# Contenido

	Pág.
Resumen .....	IX
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas .....	XV
Introducción .....	1
<b>1. Dinámica del fósforo en el suelo y su relación con el crecimiento de la planta ..3</b>	
1.1 Introducción .....	3
1.2 Formas del fósforo en el suelo.....	5
1.3 Transformaciones del fósforo en el suelo.....	5
1.4 Contenido de fósforo en el suelo y su disponibilidad.....	8
1.5 Dinámica en la rizósfera .....	11
1.6 Mecanismos de las plantas para mejorar la eficiencia en la adquisición del P	13
<b>2. Fracciones y adsorción de fósforo en suelos volcánicos de la región alto andina de Colombia 15</b>	
2.1 Introducción .....	15
2.2 Materiales y métodos.....	17
2.2.1 Análisis físico químico de los suelos .....	17
2.2.2 Fraccionamiento del fósforo .....	18
2.2.3 Isotermas de adsorción del fósforo.....	19
2.2.4 Análisis estadístico de la información .....	20
2.3 Resultados y discusión .....	20
2.3.1 Adsorción de fósforo .....	25
<b>3. Acumulación y distribución de biomasa en plantaciones juveniles de <i>Eucalyptus grandis</i> como respuesta a la aplicación de P.....31</b>	
3.1 Introducción .....	31
3.2 Materiales y métodos.....	32
3.2.1 Establecimiento de ensayos.....	32
3.2.2 Evaluaciones realizadas.....	34
3.2.3 Análisis de la información.....	36
3.3 Resultados y discusión .....	37
<b>4. Efecto de la aplicación de fósforo sobre el crecimiento del <i>Eucalyptus grandis</i> en la región alto andina de Colombia .....</b>	<b>53</b>
4.1 Introducción .....	53

4.2	Materiales y métodos .....	55
4.2.1	Evaluaciones realizadas .....	55
4.2.2	Información climática .....	56
4.2.3	Análisis de la información .....	57
4.3	Resultados y discusión.....	59
<b>5.</b>	<b>Probabilidad de respuesta en rendimiento del <i>Eucalyptus</i> al análisis de P en el suelo previo fertilización .....</b>	<b>73</b>
5.1	Introducción.....	73
5.2	Materiales y métodos .....	75
5.2.1	Análisis de la información .....	76
5.3	Resultados y discusión.....	78
<b>6.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>85</b>
6.1	Conclusiones.....	85
6.2	Recomendaciones.....	87
<b>Anexo A:</b>	<b>Métodos de análisis de laboratorio.....</b>	<b>89</b>
<b>Anexo B:</b>	<b>Propiedades físico-químicas del perfil de suelo .....</b>	<b>91</b>
<b>Anexo C</b>	<b>: Dispersión y correlación de los componentes de la biomasa por MG y sitio en función del DAP (cm).....</b>	<b>93</b>
<b>Anexo D:</b>	<b>Diferencias significativas (<math>p\text{-value}&gt;F</math>)<sup>1</sup> del sitio, material genético y nivel de P aplicado para la biomasa, LAI, concentración y cantidad de N y P en cada componente de la biomasa. Ecuación 3-2.....</b>	<b>94</b>
<b>Anexo E:</b>	<b>Acumulación de biomasa aérea y subterránea por componente, relación biomasa aérea y subterránea (Ratio) y LAI por sitio y material genético. 95</b>	
<b>Anexo F:</b>	<b>Concentración y contenido de P en cada componente de la biomasa por sitio y material genético.....</b>	<b>96</b>
<b>Anexo G:</b>	<b>Índices de crecimiento por sitio y material genético para dos niveles de P aplicados.....</b>	<b>97</b>
<b>Anexo H:</b>	<b>Significancia estadística (<math>p\text{-value}&gt;F</math>)<sup>1</sup> del sitio, material genético y tratamiento para 1 y 2 años de crecimiento acumulado. Modelo presentado en la ecuación 4-5. 98</b>	
<b>Anexo I:</b>	<b>Altura, DAP, área basal (AB), supervivencia (SUP), volumen (Vol) e incremento en volumen (Inc Vol) por sitio, material genético y nivel de P aplicado a los dos años de edad.....</b>	<b>99</b>
<b>Anexo J:</b>	<b>Diferencias significativas (<math>p\text{-value}&gt;F</math>)<sup>1</sup> del material genético y nivel de P aplicado por sitio para el volumen, área basal y concentración de N y P el follaje a través del tiempo. Ecuación 4-5.....</b>	<b>100</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>.....</b>	<b>103</b>



# Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1:</b> Modelo conceptual (Walker & Syers, 1976). .....	6
<b>Figura 1-2:</b> Formas de P en el suelo y su dinámica en el continuum suelo – rizósfera – .....	8
<b>Figura 2-1:</b> Fracciones del Pi del suelo como porcentaje del Pi total.....	24
<b>Figura 2-2:</b> Cambio en las fracciones de P. ....	25
<b>Figura 2-3:</b> Isotermas de adsorción de P ajustadas a los modelos de Langmuir (A) y . .....	27
<b>Figura 2-4.</b> Correlación entre la capacidad amortiguadora del suelo (MBC) y la energía .....	29
<b>Figura 3-1:</b> Ubicación geográfica de los sitios de estudio.....	33
<b>Figura 3-2:</b> Diseño de parcelas por tratamiento. ....	34
<b>Figura 3-3:</b> Distribución de biomasa (%) por sitio y material genético. ....	41
<b>Figura 3-4.</b> Relación biomasa aérea y radical (Shoot/Root) por sitio y material genético para cada nivel de P aplicado. ....	45
<b>Figura 3-5.</b> Tasa de crecimiento relativo promedio por cada sitio. ....	48
<b>Figura 3-6.</b> Tasa de asimilación neta por sitio y material genético. ....	49
<b>Figura 3-7.</b> Área foliar (m <sup>2</sup> ) por sitio y tratamiento para cada nivel de fertilización a través del tiempo. ....	50
<b>Figura 3-8.</b> Biomasa total en el fuste (Kgha <sup>-1</sup> ) por unidad de IAF por sitio y material genético. RSE=2002, R <sup>2</sup> <sub>ajustado</sub> =0.92 y p <sub>value</sub> <0.01 .....	51
<b>Figura 4-1:</b> Variables climáticas durante el periodo de estudio. ....	61
<b>Figura 4-2:</b> Crecimiento en volumen en función del tiempo térmico (°Dacum). ....	65
<b>Figura 4-3:</b> Distribución diamétrica por material genético y sitio para dos niveles de P aplicados a los dos años de edad.....	66
<b>Figura 4-4:</b> Índice de área foliar (IAF) a través del tiempo.....	69
<b>Figura 4-5:</b> Volumen promedio de los mejores tratamientos fertilizados en función del tiempo térmico acumulado hasta dos años de edad. ....	70
<b>Figura 5-1:</b> Relación entre el Ln P Bray II y los valores de RR modificados con la transformación de ARCSeno (RR/100) <sup>0.5</sup> 90%.....	79
<b>Figura 5-2:</b> Relación entre la respuesta relativa del volumen (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ) de plantaciones de <i>Eucalyptus</i> entre 1 y 3 años de edad y el P extraído por Bray II en el suelo en el horizonte Ap (0-30 cm). Zona de deficiencia nutricional (A), zona de deficiencia sub óptima (B) y zona de crecimiento adecuado para el <i>Eucalyptus</i> (C). ....	80

<b>Figura 5-3:</b>	Relación entre la respuesta relativa del crecimiento en volumen de plantaciones de <i>Eucalyptus</i> y el material de origen dominante en el suelo. ....	81
<b>Figura 5-4:</b>	Correlación entre la capacidad amortiguadora del suelo (MBC) y la energía de retención (k) con el P extraído por Bray II. ....	82
<b>Figura 5-5:</b>	Cantidad de P requerido ( $\text{Kgha}^{-1}$ de P) en función de diferentes concentraciones de P extraído por Bray II.....	83
<b>Figura 5-6:</b>	Respuesta relativa en crecimiento en volumen para dos materiales genéticos en suelos derivados de cenizas volcánicas a diferentes niveles de aplicación de fertilizante fosfatado. ....	84

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 1-1:</b> Fósforo orgánico y total en diferentes órdenes de suelo .....	10
<b>Tabla 2-1:</b> Ubicación geográfica y clasificación taxonómica de los sitios de estudio. ..	17
<b>Tabla 2-2:</b> Denominación de las fracciones de fósforo .....	18
<b>Tabla 2-3:</b> Propiedades físico-químicas para el horizonte Ap .....	21
<b>Tabla 2-4:</b> Fracciones de P en el suelo (0-30 cm) .....	22
<b>Tabla 2-5:</b> Valores de los coeficientes estimados y los parámetros calculados .....	26
<b>Tabla 3-1:</b> Descripción de los tratamientos.....	34
<b>Tabla 3-2:</b> Ecuaciones de biomasa de los árboles individuales (Kg/árbol) y área foliar (m <sup>2</sup> /árbol) para todos los sitios y materiales genéticos .....	39
<b>Tabla 3-3:</b> Biomasa (tha <sup>-1</sup> ) y contenido de N y P (kg ha <sup>-1</sup> ) promedio a un año de edad ....	44
<b>Tabla 3-4:</b> Contenido de P en la biomasa total (Kg P ha <sup>-1</sup> ) y eficiencia en el uso de P (EUP) en plantaciones de <i>Eucalyptus grandis</i> .....	46
<b>Tabla 4-1:</b> Información climática durante los periodos de medición por sitio .....	59
<b>Tabla 4-2:</b> Valores promedios por efectos para las variables altura, DAP, área basal (AB), y volumen (Vol) para los años 1 y 2.....	63
<b>Tabla 5-1:</b> Sitios seleccionados para calibración por edad y clasificación taxonómica de suelo. 76	
<b>Tabla 5-2:</b> Estimados de las curvas de respuesta en volumen ajustadas .....	78

## Bibliografía

- Aaron-Morrison, A. P., Ackerman, S. A., Adams, N. G., Adler, R. F., Albanil, A., Alfaro, E. J., ... Young, T. (2016). *State of the climate in 2015. Global Climate* (Vol. 97). <https://doi.org/10.1175/2016BAMSStateoftheClimate.1>
- Abdel-Fattah, G. M., Asrar, A. A., Al-Amri, S. M., & Abdel-Salam, E. M. (2014). Influence of arbuscular mycorrhiza and phosphorus fertilization on the gas exchange, growth and phosphatase activity of soybean (*Glycine max* L.) plants. *Photosynthetica*, *52*(4), 581–588. <https://doi.org/10.1007/s11099-014-0067-0>
- Abedi, M. J., & Talibudeen, O. (1974). The calcareous soils of Azerbaijan. II. Phosphate status. *Journal of Soil Science*, *25*, 373–383.
- Albaugh, T. ., Allen, H. L., Dougherty, P. M., Kress, L. W., & King, J. S. (1998). Leaf area and above- and belowground growth responses of loblolly pine to nutrient and water additions. *Forest Science*, *44*(2), 317–328.
- Albaugh, T. J., Allen, L. ., Dougherty, P. ., & Johnsen, K. . (2004). Long term growth responses of loblolly pine to optimal nutrient and water resource availability. *Forest Ecology and Management*, *192*, 3–19.
- Albaugh, T. J., Vance, E. D., Gaudreault, C., Fox, T. R., Allen, L. H., Stape, J. L., & Rubilar, R. A. (2012). Carbon emissions and sequestration from fertilization of pine in the southeastern United States. *Forest Science*, *58*(5), 419–429.
- Almeida, A. C., Landsberg, J. J., & Sands, P. J. (2004). Parameterisation of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. *Forest Ecology and Management*, *193*(1–2), 179–195. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.029>
- Álvarez, J.S., Allen, H.L., Albaugh, T.J., Stape, J.L., Bullock, B.P., Song, C. (2013). Factors influencing the growth of radiata pine plantations. *Forestry. An International Journal of Forest Research*, *86*, 13–26.
- Anderson, G. (1980). Assessing Organic phosphorus in Soils. In F. . Khasawneh, E. C. Sample, & E. . Kamprath (Eds.), *The Role of phosphorus in agriculture* (p. 893). American Society of Agronomy Crop Science Society of America Soil Science

- Society of America Madison, Wisconsin USA. [https://doi.org/10.1016/0306-9192\(76\)90079-8](https://doi.org/10.1016/0306-9192(76)90079-8)
- Ashley, K., Cordell, D., & Mavinic, D. (2011). A brief history of phosphorus: From the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse. *Chemosphere*, *84*(6), 737–746. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.03.001>
- Attiwil, P. M., & Adams, M. A. (1996). *Nutrition of Eucalypts*. (C. Publishing, Ed.). Collingwood.
- Auxtero, E., Madeira, M., & Sousa, E. (2008). Phosphorus sorption maxima and desorbability in selected soils with andic properties from the Azores, Portugal. *Geoderma*, *144*, 535–544. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.01.008>
- Ávila-Pedraza, E. A. (2005). Los suelos de Colombia y sus estadísticas más recientes. *Análisis Geográficos*, *29*, 13–21.
- Bais, H. P., Weir, T. L., Perry, L. G., Gilroy, S., & Vivanco, J. M. (2006). The Role of Root Exudates in Rhizosphere Interactions With Plants and Other Organisms. *Annual Review of Plant Biology*, *57*(1), 233–266. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.57.032905.105159>
- Balemi, T., & Negisho, K. (2012). Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *12*(3), 547–561. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162012005000015>
- Baligar, V. C., Fageria, N. K., & He, Z. L. (2001). Nutrient Use Efficiency in Plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *32*(7–8), 921–950. <https://doi.org/10.1081/CSS-100104098>
- Ballard, R. (1980). Phosphorus nutrition and fertilization of forest trees. In E. J. Khasawneh, F., Sample, E.C., Kamprath (Ed.), *The Role of Phosphorus in Agriculture* (pp. 763–804). Madison, WI.
- Ballard, R. (1984). Fertilization of plantations. In *Nutrition of Plantations Forest* (pp. 119–146). New York, USA: Academic Press.
- Barros, N. F., Filho, Comerford, N. B., & Barros, N. F. (2005). Phosphorus sorption, desorption and resorption by soils of the Brazilian Cerrado supporting eucalypt. *Biomass and Bioenergy*, *28*(2), 229–236. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.08.005>
- Bergh, J., Linder, S., Lundmark, T., & Elfving, B. (1999). The effect of water and nutrient

- availability on the productivity of Norway spruce in northern and southern Sweden. *Forest Ecology and Management*, 119(1–3), 51–62. [https://doi.org/10.1016/s0378-1127\(98\)00509-x](https://doi.org/10.1016/s0378-1127(98)00509-x)
- Binkley, D., Stape, J. L., Ryan, M. G., Barnard, H. R., Binkley, D., Stape, J. L., ... Fownes, J. (2002). Age-related Decline in Forest Ecosystem Growth : An Individual- Tree , Stand-Structure Hypothesis. *Ecosystems*, 5(1), 58–67. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0055-7>
- Birk, E. M. (1992). Nitrogen Availability in Radiata Pine Plantations on Former Pasture Sites in Southern New-South-Wales. *Plant and Soil*, 143, 115–125.
- Birk, E. M., & Turner, J. (1992). Response of flooded gum (*E. grandis*) to intensive cultural treatments: biomass and nutrient content of eucalypt plantations and native forests. *Forest Ecology and Management*, 47(1–4), 1–28. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(92\)90262-8](https://doi.org/10.1016/0378-1127(92)90262-8)
- Bolan, N. S. (1991). A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. *Plant and Soil*, 134, 189–207.
- Borden, D. I. (1984). Early response to different methods of site preparation for three commercial tree species. In *IUFRO Symposium on site and productivity of fast growing plantations. Preterria and Pietermaritzburg, South Africa* (pp. 565–578). Pretoria.
- Boschetti, N. G., Quintero, C. E., Benavidez, R. a, & Giuffre, L. (2003). Cuantificación de las fracciones orgánica e inorgánica de fósforo en suelos de la mesopotamia argentina. *Ciencia Del Suelo*, 21(1), 1–8.
- Bouillet, J. P., Laclau, J. P., Arnaud, M., & Thongo, A. (2002). Changes with age in the spatial distribution of roots of a Eucalyptus clone in the Congo. Impact on water and nutrient uptake ability. *Forest Ecology and Management*, 171, 43–57.
- Bowman, R. A., & Cole, C. V. (1978). An Exploratory Method for Fractionation of Organic Phosphorus From Grassland Soils. *Soil Science*, 125(2), 95–101.
- Bravo, I., Marquinez, L., & Potosí, S. (2007). Fraccionamiento del fósforo y correlación con la materia orgánica en dos suelos del departamento del Cauca. *Suelos Ecuatoriales*, 37(2), 147–154.
- Bravo, I., Montoya, J. C., & Menjivar, J. C. (2013). Retención y disponibilidad de fósforo asociado a la materia orgánica en un Typic Melanudands del departamento del

- Cauca, Colombia = Retention and availability of phosphorus associated with organic matter in a Typic Melanudands of Cauca department, Colombi. *Acta Agronómica*, 62(3), 261–267. Retrieved from [http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta\\_agronomica/article/view/34828/43564](http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/34828/43564)
- Bucher, M. (2007). Functional biology of plant phosphate uptake at root and mycorrhiza interfaces. *New Phytologist*, 173(1), 11–26. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01935.x>
- Bücking, H., Liepold, E., & Ambilwade, P. (2012). The Role of the Mycorrhizal Symbiosis in Nutrient Uptake of Plants and the Regulatory Mechanisms Underlying These Transport Processes. In N. K. Dhal & S. C. Sahu (Eds.), *Plant Science*. <https://doi.org/10.5772/52570>
- Buol, S., & Eswaran, H. (2000). Oxisols. In D. Sparks (Ed.), *Advanced in Agronomy* (1st Editio, p. 331).
- Campbell, R., & Greaves, M. P. (1990). Anatomy and community structure of the rhizosphere. In J. M. Lynch (Ed.), *Ecological And Applied Microbiology* (p. 458). John Wiley and Sons Ltd.
- Cannell, M. G. R. (1989). Physiological Basis of wood production: a review. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 4, 459–490.
- Celi, L., & Barberis, E. (2004). Abiotic stabilization of organic phosphorus in the environment. In B. L. Turner, E. Frossard, & D. S. Baldwin (Eds.), *Organic Phosphorus in the Environment* (p. 432).
- Cerón, L., & Aristizábal, F. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285–295.
- Chang, S., & Jackson, M. (1957). Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am*, 84, 133–144.
- Chen, C. R., Condon, L. M., Davis, M. R., & Sherlock, R. R. (2002). Phosphorus dynamics in the rhizosphere of perennial ryegrass ( *Lolium perenne* L .) and radiata pine ( *Pinus radiata* D . Don .). *Soil Biology & Biochemistry*, 34, 487–499.
- Chen, C. R., Condon, L. M., & Xu, Z. H. (2008). Impacts of grassland afforestation with coniferous trees on soil phosphorus dynamics and associated microbial processes: A review. *Forest Ecology and Management*, 255(3–4), 396–409. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.10.040>

- Cheng, L., Bucciarelli, B., Liu, J., Zinn, K., Miller, S., Patton-Vogt, J., ... Vance, C. P. (2011). White Lupin Cluster Root Acclimation to Phosphorus Deficiency and Root Hair Development Involve Unique Glycerophosphodiester Phosphodiesterases. *Plant Physiology*, 156(3), 1131–1148. <https://doi.org/10.1104/pp.111.173724>
- Chica, H., Peña, A., Giraldo, J., Obando, D., & Riaño, N. (2014). SueMulador: Herramienta para la Simulación de Datos Faltantes en Series Climáticas Diarias de Zonas Ecuatoriales. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 67(2), 7365–7373.
- 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, 1261–1266. <https://doi.org/10.2136/sssaj1990.03615995005400050010x>
- Condon, L. M., Turner, B. L., & Cade-Menun, B. J. (2005). Characterizing phosphorus in environmental and agricultural samples by <sup>31</sup>P nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Talanta*, 66, 359–371.
- Crews, T. E. (1996). The supply of phosphorus from native, inorganic phosphorus pools in continuously cultivated Mexican agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 57, 197–208. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(95\)01013-0](https://doi.org/10.1016/0167-8809(95)01013-0)
- Crews, T. E., Kitayama, K., Fownes, J. H., Riley, R. H., Herbert, D. A., Mueller-dombois, D., & Vitousek, P. M. (1995). Changes in Soil Phosphorus Fractions and Ecosystem Dynamics across a Long Chronosequence in Hawaii. *Ecology*, 76(5), 1407–1424.
- Cromer, R. (1999). CASE STUDY 16.2 Nutrient response in *Eucalyptus grandis*. In B. J. Atwell, P. Kriedemann, & . Turnbull (Eds.), *Plants in Action Adaptation in Nature, Performance in Cultivation* (1st ed., pp. 2–5).
- Cromer, R. N., Cameron, D. M., Rance, S. J., Ryan, P. A., & Brown, M. (1993a). Response to nutrients in *Eucalyptus grandis*. 1. Biomass accumulation. *Forest Ecology and Management*, 62(1–4), 211–230. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(93\)90051-N](https://doi.org/10.1016/0378-1127(93)90051-N)
- Cromer, R. N., Cameron, D. M., Rance, S. J., Ryan, P. A., & Brown, M. (1993b). Response to nutrients in *Eucalyptus grandis*. 2. Nitrogen accumulation. *Forest Ecology and Management*, 62(1–4), 231–243. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(93\)90052-O](https://doi.org/10.1016/0378-1127(93)90052-O)



- Cromer, R. N., Smethurst, P., Turnbull, C., Misra, R., LaSala, A., Herbert, A., & Dimsey, L. (1995). Early growth of *Eucalyptus* in Tasmania in relation to nutrition. In C. A. Potts B.M., Borralho, N.M.G., Reid, J.B., Cromer, R.N., Tibbits, W.N., Raymond (Ed.), *Eucalypt Plantations: Improving Fibre Yield and Quality. CRC for Temperate Hardwood Forestry, Hobart* (pp. 331–335).
- 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. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(94\)00023-4](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)00023-4)
- Damon, P. M., Bowden, B., Rose, T., & Rengel, Z. (2014). Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: A review. *Soil Biology and Biochemistry*, *74*, 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.03.003>
- Doddab, J. R., & Mallarino, A. P. (2005). Soil-Test Phosphorus and Crop Grain Yield Responses to Long-Term Phosphorus Fertilization for Corn-Soybean Rotations. *Soil Sci. Soc. Am. Journal*, *69*(4), 1118–1128. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0279>
- Dyson, C. B., & Conyers, M. K. (2013). Methodology for online biometric analysis of soil test-crop response datasets. *Crop and Pasture Science*, *64*(5), 435–441. <https://doi.org/10.1071/CP13009>
- Dzotsi, K. A., Jones, J. W., Adiku, S. G. K., Naab, J. B., Singh, U., Porter, C. H., & Gijssman, A. J. (2010). Modeling soil and plant phosphorus within DSSAT. *Ecological Modelling*, *221*(23), 2839–2849. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.08.023>
- Evans, J. (1982). *Plantation Forestry in the Tropics*. (C. Press, Ed.). Oxford, England.
- FAO. (2011). Situación de los bosques del mundo. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Fassbender, H. W., & Bornemisza, E. (1987). *Química de Suelos con énfasis en suelos de América Latina*. (F. De la Torre de Kingsley & M. Snarskis, Eds.) (2a. edición). San José, Costa Rica: Servicio Editorial del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Fernandez, J. Q. P., Dias, L. E., Barros, N. F., Novais, R. F., & Moraes, E. J. (2000). Productivity of *Eucalyptus camaldulensis* affected by rate and placement of two phosphorus fertilizers to a Brazilian Oxisol. *Forest Ecology and Management*, *127*(1–3), 93–102. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00121-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00121-8)
- Ferreira, M. G. M., Kimmins, J. F., & Barros, N. . (1984). Impact of intensive management

- on phosphorus in *Eucalypts grandis*. Plantations in the Savannah Region, Minas Gerais, Brazil. In *IUFRO Symposium on site and productivity of fast growing plantations. South Africa Proceedings (2)* (pp. 847–855).
- Fisher, R. F., & Binkley, D. (2000). Ecology and management of forest soils. In I. John Wiley & Sons (Ed.), *Ecology and Management of Forest Soil* (Third Edit, p. 368). New York, USA.
- Flinn, D. W., Moller, I. M., & Hopmans, P. (1979). Sustained growth responses to superphosphate applied to established stands of *Pinus radiata*. New Zealand. *Journal of Forestry Science*, 9(2), 201–211.
- Föhse, D., Claassen, N., & Jungk, A. (1988). Phosphorus efficiency of plants: I. External and internal P requirement and P uptake efficiency of different plant species. *Plant and Soil*, 110(1), 101–109.
- Fontaine, S., Mariotti, A., & Abbadie, L. (2003). The priming effect of organic matter: A question of microbial competition? *Soil Biology and Biochemistry*, 35(6), 837–843. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00123-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00123-8)
- Fox, R. L. (1974). Examples of anion and cation adsorption by soil tropical America. *Tropical Agriculture*, 51, 200–210.
- Fox, R. L., & Kamprath, E. J. (1970). Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 34(5), 902–907. <https://doi.org/10.2136/sssaj1970.03615995003400060025x>
- Freundlich, H. (1929). *Colloid and Capillary Chemistry*. Meuthen, London.
- 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. <https://doi.org/10.1023/A:1004226708485>
- Gijsman, A. J., Oberson, A., And, H. T., & Friesen, D. K. (1996). Limited Applicability of the CENTURY Model to Highly Weathered Tropical Soils. *Agron. J.*, 88(6), 894–903. <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962003600060008x>
- Gonçalves, J. L. M., Stape, J. L., Laclau, J. P., Smethurst, P., & Gava, J. L. (2004). Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*, 193, 45–61.
- Gonçalves de Moraes, J. L., Alvares Alcarde, C., Rioyei Higa, A., Silva Duque, L., Couto Alfenas, A., Stahl, J., ... Epron, D. (2013). Integrating genetic and silvicultural

- strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*, 301, 6–27.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030>
- Graciano, C., Tambussi, E. A., Castán, E., & Guiamet, J. J. (2009). Dry mass partitioning and nitrogen uptake by *Eucalyptus grandis* plants in response to localized or mixed application of phosphorus. *Plant and Soil*, 319(1–2), 175–184.  
<https://doi.org/10.1007/s11104-008-9859-y>
- Graham, J. H., & Miller, M. (2005). Root Physiology: from Gene to Function: From Gene to Function. *Plant and Soil*, 100, 286. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-1419-5>
- Graham, R., & Gregorio, D. (2001). Breeding for nutritional characteristics in cereals. *Novartis Found Symp*, 14, ;236:205.
- Gray, J., & Murphy, B. (2002). Parent material and world soil distribution. In *17th World Congress of Soil Science* (Vol. 2215, pp. 1–12). Bangkok, Thailand.
- Grove, T. S., Thomson, B. D., & Malajczuc, N. (1996). The Nutritional Physiology of Eucalypts: uptake, distribution and utilization. In P. M. Attiwill & M. A. Adams (Eds.), *Nutrition of Eucalypts* (pp. 327–332). Australia: CSIRO.
- Gunes, A., Inal, A., Alpaslan, M., & Cakmak, I. (2006). Genotypic variation in phosphorus efficiency between wheat cultivars grown under greenhouse and field conditions. *Soil Science and Plant Nutrition*, 52(4), 470–478. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2006.00068.x>
- Guo, F., & Yost, R. (1998). Partitioning Soil Phosphorus Into Three Discrete Pools of Differing Availability. *Soil Science*, 163(10). <https://doi.org/10.1097/00010694-199810000-00006>
- Hawkes, C. V, Deangelis, K. M., & Firestone, M. K. (2007). Root Interactions with Soil Microbial Communities and Processes. *The Rhizosphere: An Ecological Perspective*, 1–29. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-088775-0.50003-3>
- Hebert, M. A. (1996). Fertilizers and Eucalypt Plantations in South Africa. In P. . Attiwill & M. . Adams (Eds.), *Nutrition of Eucalypts* (pp. 303–324). Melbourne, Australia: CSIRO.
- Hebert, M. A., & Robertson, M. A. (1991). Above-ground biomass composition and nutrient content for Eucalypts species in the southeastern Transvaal. In *IUFRO Symposium-Intensive Forestry: the Role of Eucalypts Vol 2* (pp. 662–674).
- Hedley, M. J., Stewart, J. W. B., & Chauhan, B. S. (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. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050017x>
- Herbert, M. A. (1990). Fertilizer/site interactions on the growth and foliar nutrient levels of *Eucalyptus grandis*. *Forest Ecology and Management*, 30(1–4), 247–257. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(90\)90140-7](https://doi.org/10.1016/0378-1127(90)90140-7)
- Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and Soil*, 237, 173–195. <https://doi.org/10.1023/A:1013351617532>
- Hinsinger, P., Bengough, A. G., Vetterlein, D., & Young, I. M. (2009). Rhizosphere: Biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. *Plant and Soil*, 321(1–2), 117–152. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9885-9>
- Holford, I. (1997). Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. *Australian Journal of Soil Research*, 35(2), 227–240. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1071/S96047>
- <https://watersag.com/service/plant-analysis/>. (2017). Plant Analysis.
- Hunt, R. (2003). Growth Analysis, Individual Plants. In B. Thomas, D. J. Murphy, & D. Murray (Eds.), *Encyclopaedia of applied plant science* (pp. 588–596). London: Academic Press.
- Iyamuremye, F., Dick, R. P., & Baham, J. (1996). Organic Amendments and Phosphorus Dynamics: II. Distribution of Soil Phosphorus Fractions. *Soil Science Society of America Journal*, 161(7), 436–443. <https://doi.org/10.1097/00010694-199607000-00003>
- Jaeger III, C. H., Lindow, S. E., Miller, W., Clark, E., & Firestone, M. K. (1999). Mapping sugar and amino acid exudation from roots in soil using bacterial sensors of sucrose and tryptophan. *Applied and Environmental Microbiology*, 65(6), 2685–2690.
- Jones, D. L., Hodge, A., & Kuzyakov, Y. (2004). Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition. *New Phytologist*, 163(3), 459–480. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01130.x>
- Judd, T. S., Attiwill, P. M., & Adams, M. . (1996). Nutrient Concentrations in Eucalypts: A synthesis in relation to differences between taxa, sites and components. In P. M. Attiwill & M. . Adams (Eds.), *Nutrition of Eucalypts* (pp. 123–154). Melbourne,

Australia: CSIRO.

- Juo, A. S. . (1981). Chemical characteristics. In D. J. Greenland (Ed.), *Characteristics of Soils* (pp. 51–79). Oxford.
- Khan, Q. U., Khan, M. J., Saif-ur-Rehman, & Ullah, S. (2010). Comparison of different models for phosphate adsorption in salt inherent soil series of Dera Ismail Khan. *Soil and Environment*, 29(1), 11–14.
- Kirschbaum, M., & Tompkins, D. (1990). Photosynthetic Responses to Phosphorus Nutrition in *Eucalyptus grandis* Seedlings. *Functional Plant Biology*, 17, 527–535.  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1071/PP9900527>
- Kochian, L. V., Hoekenga, O. A., & Pineros, M. A. (2004). How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. *Annual Review of Plant Biology*, 55, 459–493.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141655>
- Kriedemann, P. E., & Cromer, R. N. (1996). The Nutritional Physiology of Eucalypts- Nutrition and Growth. In P. M. Attiwil & M. A. Adams (Eds.), *Nutrition of Eucalypts* (pp. 109–122). Australia: CSIRO.
- Laclau, J. P., Ranger, J., Gonçalves, J. L. M., Maquere, V., Krusche, A. V., M'Bou, A. T., ... Deleporte, P. (2010). Biogeochemical cycles of nutrients in tropical *Eucalyptus* plantations: main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. *Forest Ecology and Management*, 259, 1771–1785.
- Lambers, H., Shane, M. W., Cramer, M. D., Pearse, S. J., & Veneklaas, E. J. (2006). Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: Matching morphological and physiological traits. *Annals of Botany*, 98(4), 693–713.  
<https://doi.org/10.1093/aob/mcl114>
- Landeweert, R., Hoffland, E., Finlay, R. D., Kuyper, T. W., Breemen, N. Van, & Finlay, R. D. (2001). Linking plants to rocks : ectomycorrhizal fungi mobilize nutrients from minerals. *Trends in Ecology and Evolution*, 16(5), 248–254.
- Langmuir, I. (1916). The evaporation, condensation and reflection of molecules and the mechanism of adsorption. *Phys. Rev.*, VIII(4), 149–176.
- Lehmann, J., Gunther, D., Mota, M. S., Almeida, M., Zech, W., & K, K. (1999). Singletree effects on soil P and S pools in a multi-strata agroforestry system. In F. Jimenez & J. Beer (Eds.), *Multi - Strata Agroforestry Systems with Perennial Crops* (p. 287). Turrialba, Costa rica.

- Lilienfein, J., Wilcke, W., Neufeldt, H., Ayarza, M. A., & Zech, W. (1999). Phosphorus pools in bulk soil and aggregates of differently textured oxisols under different land-use systems in the Brazilian cerrados. In R. J. Thomas & M. A. Ayarza (Eds.), *Sustainable land management for the oxisols of the Latin American savannas: Dynamics of soil organic matter and indicators of soil quality*. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical. Retrieved from [http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos\\_Ciat/biblioteca/Sustainable\\_land\\_management\\_for\\_the\\_oxis.pdf#page](http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/biblioteca/Sustainable_land_management_for_the_oxis.pdf#page)
- Lilienfeina, J., Wilckea, W., Ayarza, M. A., Vilelac, L., Limad, S. do C., & Zech, W. (2000). Chemical fractionation of phosphorus, sulphur, and molybdenum in Brazilian savannah Oxisols under different land use. *Geoderma*, 96(1–2), 31–46. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00002-1](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00002-1)
- Limousin, G., Gaudet, J. P., Charlet, L., Szenknect, S., Barthès, V., & Krimissa, M. (2007). Sorption isotherms: A review on physical bases, modeling and measurement. *Applied Geochemistry*, 22(2), 249–275. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2006.09.010>
- Linquist, B. A., Singleton, P. W., & Cassman, K. G. (1997). Inorganic and Organic Phosphorus Dynamics During A Build-Up and Decline of Available Phosphorus in An Ultisol. *Soil Science Society of America Journal*, 162(4), 254–264. <https://doi.org/10.1097/00010694-199704000-00003>
- Lynch, J. P. (2007). Turner review no. 14. Roots of the second green revolution. *Australian Journal of Botany*, 55(5), 493–512. <https://doi.org/10.1071/BT06118>
- Lynch, J. P., & Brown, K. M. (2001). Topsoil foraging - an architectural adaptation of plants to low phosphorus availability. *Plant and Soil*, 239(2), 225–237. <https://doi.org/10.1023/A:1013324727040>
- Lynch, J., & Whipps, J. . (1990). Substrate flow in the rhizosphere. *Plant and Soil*, 129(1), 1–10. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/42936908>
- Marschner, H. (1995). *Mineral nutrition of higher plants* (Second Edi). Academic Press.
- Marschner, H., Römheld, V., Horst, W. J., & Martin, P. (1986). Root-induced changes in the rhizosphere: Importance for the mineral nutrition of plants. *Plant Nutrition and Soil Science*, 149(4), 441–456. <https://doi.org/10.1002/jpln.19861490408>
- Marschner, P. (2011). *Chapter 15 Rhizosphere Biology. Marschner's Mineral Nutrition of*

- Higher Plants: Third Edition*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00015-7>
- Martin, J. . (1983). Biology of the Rhizosphere. In C. D. of Soils. (Ed.), *Soils : an Australian viewpoint* (pp. 685–692). Melbourne : CSIRO ; London : Academic Press.
- McLaughlin, M. J. (1996). Phosphorus in Australian Forest Soils. In P. M. Attiwill & M. A. Adams (Eds.), *Nutrition of Eucalypts* (pp. 1–30). Melbourne, Australia: CSIRO.
- Mehta, N. C., Legg, J. O., Goring, C. A. I., & Black, C. A. (1954). Determination of Organic Phosphorus in Soils: I. Extraction Method. *Soil Science Society of America Journal*, 18(4), 443–449. <https://doi.org/10.2136/sssaj1954.03615995001800040023x>
- Mejía de T. María Sara. (2014). *RESPUESTA FISIOLÓGICA DEL Eucalyptus grandis AL ESTRÉS HÍDRICO*.
- Mejía de Tafur, M. ., Zapata, C. ., Urrego, J. ., Ibarra, D. ., & Leal, J. . (2017). Efecto del estrés hídrico sobre la acumulación y distribución de biomasa en *Eucalyptus grandis* W . Hill ex Maiden Effect of water stress on accumulation and distribution of biomass in *Eucalyptus*. *Acta Agronómica*, 66(1), 56–62.
- Mendham, D. S. (1998). *Predicting P limitations in Eucalyptus plantations*. University of Tasmania.
- Mendoza, R. (1986). Isotermas de adsorción de fósforo en suelos Argentinos: II. Aplicación de las isotermas e interrelación de sus parámetros con variables de suelo y planta. *Ciencia Del Suelo*, 2, 117–124.
- Miller, H. G. (1981). Forest fertilization: Some guiding concepts. *Forestry*, 54(2), 157–167. <https://doi.org/10.1093/forestry/54.2.157>
- Mohr, H. (1995). *Plant Physiology*. (H. Mohr & P. Schopfer, Eds.). Berlin, Germany: Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. KG. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-97570-7>
- NAnzyo, M. (2002). Unique Properties of Volcanic Ash Soils. *Global Environmental Research*, 6, 99–112.
- Nehl, D. B., Allen, S. J., & Brown, J. F. (1997). Deleterious rhizosphere bacteria: an integrating perspective. *Applied Soil Ecology*, 5(1), 1–20. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(96\)00124-2](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(96)00124-2)
- Neilsen, W. . (1996). Response of *Eucalyptus nitens* and *Eucalyptus regnans* seedlings to application of various fertilisers at planting or soon after planting. New Zealand. *Journal of Forestry Science*, 26(3), 355–369.

- Neumann, G., & Römheld, V. (2000). The release of root exudates as affected by the plant physiological status. In R. Pinton, Z. Varanini, & Z. Nannipieri (Eds.), *The Rhizosphere: Biochemistry and organic substances at the soil-plant interface* (pp. 23–72). <https://doi.org/doi:10.1201/9781420005585.ch2>
- Neumann, G., & Römheld, V. (2011). Rhizosphere Chemistry in Relation to Plant Nutrition. In *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition* (pp. 347–368). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00014-5>
- Nguyen, C. (2003). Agronomy for sustainable development. *Agronomie*, 23, 375–396. <https://doi.org/10.1051/agro:2003011>
- Nurwakera, J. (1991). *Soil phosphorus dynamics during continuous cultivation in a Brazilian Amazon Oxisol*. North Carolina State University.
- Oberson, A., Friesen, D. K., Rao, I. M., Buhler, S., & Frossard, E. (2001). Phosphorus Transformations in an Oxisol under contrasting land- use systems: The role of the soil microbial biomass. *Plant and Soil*, 237(2), 197–210. <https://doi.org/10.1023/A:1013301716913>
- Oberson, A., Friesen, D. K., Tiessen, H., Morel, C., & Stahel, W. (1999). Phosphorus status and cycling in native savanna and improved pastures on an acid low-P Colombian Oxisol. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 55(1), 77–88. <https://doi.org/10.1023/A:1009813008445>
- Oelkers, E. H., & Valsami-Jones, E. (2008). and Global Sustainability. *Elements*, 4, 83–88. <https://doi.org/10.2113/GSELEMENTS.4.2.83>
- Oliveira, A. S. de, Steidle Neto, A. J., Ribeiro, A., Rascon, N. J. L., Rody, Y. P., & Almeida, A. Q. de. (2012). Determinação do tempo térmico para o desenvolvimento de mudas de eucalipto na fase de enraizamento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental*, 16(11), 1223–1228. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001100011>
- Palm, C., Sanchez, P., Ahamed, S., & Awiti, A. (2007). Soils: A Contemporary Perspective. *Annual Review of Environment and Resources*, 32(1), 99–129. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.31.020105.100307>
- Pereira, J. S., Linder, S., Araujo, M. C., Pereira, H., Ericsson, T., Borralho, N., & Leal, L. C. (1989). Optimización of biomass production in Eualypts globulus plantations. A case study. In J. S. Pereira & J. J. Landsberg (Eds.), *Biomass Production by Fast-*



- Growing Trees*. (pp. 101–121). Dordrecht.
- Picard, N., Saint-André, L., & Henry, M. (2012). *Manual for building tree volume and biomass allometric equations from field measurement to prediction*.
- Pierzynski, G. M., McDowell, R. ., & Sims, J. T. (2005). Chemistry, cycling and potential movement of inorganic phosphorus in soils. In J. T. Sharpley & A. N. Sims (Eds.), *Phosphorus, Agriculture and the Environment*. (pp. 53–86). Madison, WI.: Soil Science Society of America.
- Pinochet, Dante, Epple, German, MacDonald, R. (2001). FRACCIONES DE FOSFORO ORGANICO E INORGANICO EN UN TRANSECTO DE SUELOS DE ORIGEN VOLCANICO Y METAMORFICO. *Revista de La Ciencia Del Suelo Y Nutrición Vegetal*, 1(2), 58–69.
- Plaxton, W. C., & Carswell, M. C. (1999). Metabolic aspects of the phosphate starvation response in plants. In H. R. Lerner & M. Dekker (Eds.), *Plant Responses to Environmental Stresses, from Phytohormones to Genome Reorganization* (pp. 350–372). New York, USA.
- Prasad, M. (2013). *A Literature Review on the Availability of Phosphorus from Compost in Relation to the Nitrate Regulations SI 378 of 2006 Small-Scale Study Report*. Wexford, Ireland.
- Quintero, J. (1990). comportamiento del fosforo en suelos de cenizas volcanicasdf.pdf. *Revista Académica Colombiana de Ciencias*, 17(66), 467–476.
- Raghothama, K. G. (1999). Phosphate Acquisition. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 50, 665–693.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.665>
- Ramaekers, L., Remans, R., Rao, I. M., Blair, M. W., & Vanderleyden, J. (2010). Strategies for improving phosphorus acquisition efficiency of crop plants. *Field Crops Research*, 117(2–3), 169–176. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.03.001>
- Randhawa, P. S., Condon, L. M., Di, H. J., Sinaj, S., & McLenaghan, R. D. (2005). Effect of Green Manure Addition on Soil Organic Phosphorus Mineralisation. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 73(2), 181–189. <https://doi.org/10.1007/s10705-005-0593-z>
- Rao, I., & Barrios, E. (2004). Soil phosphorus dynamics, acquisition and cycling in crop-pasture-fallow systems in low fertility tropical soils: A review from Latin America. *ACIAR Proceedings Modelling Nutrient Management in Tropical Cropping Systems*,

- 126–134. Retrieved from  
<http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/135389/2/PR114.pdf#page=125>
- Reed, S. C., Townsend, A. R., Taylor, P. G., & Cleveland, C. C. (2011). *Chapter 14 Phosphorus Cycling in Tropical Forests Growing on Highly Weathered Soils*. (E. K. B. et Al., Ed.), *Phosphorus in Action, Soil Biology* (Vol. 26).  
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-15271-9>
- Riaño, N. M., Tangarife, G., Osorio, O. I., Giraldo, J. F., Ospina, C. M., Obando, D., ... Jaramillo, L. F. (2005). CREFT. Modelo de crecimiento y captura de carbono para especies forestales en el trópico. *FNC-CENICAFE*, 51.
- Richardson, A. E. (2007). Making microorganisms mobilize soil phosphorus. *Developments in Plant and Soil Sciences*, 102, 85–90. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5765-6\\_10](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5765-6_10)
- Richardson, A. E., & Simpson, R. J. (2011). Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus. *Plant Physiology*, 156(3), 989–996.  
<https://doi.org/10.1104/pp.111.175448>
- Rodas, C. A. (2016). *Informe fitosanitario de las fincas Buenos Aires y Cabuyerita. Reporte Interno SKColombia*.
- Rodrigues, P. A., Barros, N. F., Coutinho de Andrade, D., & de Campos, P. T. (1984). Concentração e distribuição de nutrientes em *Eucalypts grandis* em função da idade, cultivado na região do cerrado. *Brasil Florestal*, 59, 27–37.
- Rodriguez, J., & Alvarez, J. (2010). *Nutrición y Fertilización de Plantaciones Forestales*. Santiago de Chile.
- Rubilar, R. (2005). *Environmental constraints on growth phenology, leaf area display, and above and belowground biomass accumulation of Pinus radiata (D. Don) in Chile*. North Carolina State University.
- Saint-André, L., Nouvellon, Y., Laclau, J. P., Ranger, J., Bouillet, J. P., Nzila, J. D., ... Goncalves, J. L. M. (2004). Modelling nutrient cycling and integrating nutrient cycling into growth models. In E. K. S. Nambiar, J. Ranger, A. Tiarks, & T. Toma (Eds.), *Site Management and productivity in tropical plantation forest* (p. 228). Indonesia: CIFOR.
- Satoo, T., & Madgwick, M. A. (1982). Methods of estimating forest biomass. In D. W. J. P. Martinus Nijhoff (Ed.), *Forest Biomass* (pp. 15–46). Kluwer Boston.
- Saunders, W. M. H., & Williams, E. G. (1955). Observations on the determination of total

- organic phosphorus in soils. *European Journal of Soil Science*, 6(2), 254–267.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1955.tb00849.x>
- Schachtman, D. P., Reid, R. J., & Ayling, S. M. (1998). Update on Phosphorus Uptake  
Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell. *Plant Physiology*, 116, 447–453.  
<https://doi.org/10.1104/pp.116.2.447>
- Schlesinger, W. H., Bruijnzeel, L. A., Bush, M. B., Klein, E. M., Mace, K. A., Raikes, J. A.,  
& Whittaker, R. J. (1998). The biogeochemistry of phosphorus after the first century  
of soil development on Rakata Island, Krakatau, Indonesia. *Biogeochemistry*, 40(1),  
37–55. <https://doi.org/10.1023/A:1005838929706>
- Sedjo, D and Botkin, R. (1997). Using plantations to spare natural forests. *Environmental*,  
39, 14–20.
- Shen, J., Lixing, Y., Junling, Zhang. Haigang, L., Zhaohai, B., Xinping, Chen. Weifeng, Z.,  
& Fusuo, Z. (2011). Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. *Plant Physiology*,  
156(3), 997–1005. <https://doi.org/10.1104/pp.111.175232>
- Shirvani, M., Shariatmadari, H., & Kalbasi, M. (2005). Phosphorus buffering capacity  
indices as related to soil properties and plant uptake. *Journal of Plant Nutrition*, 28,  
537–550. <https://doi.org/10.1081/PLN-200049235>
- Shoji, S., & Takahashi, T. (2002). Environmental and agricultural significance of volcanic  
ash soils. *Global Environmental Research-English Edition*, 6(2), 113–135. Retrieved  
from  
[http://www.airies.or.jp/attach.php/6a6f75726e616c5f30362d32656e67/save/0/0/06\\_2-12.pdf](http://www.airies.or.jp/attach.php/6a6f75726e616c5f30362d32656e67/save/0/0/06_2-12.pdf)
- Silva Rossi, M. ., Rollán, A. ., & Bachmeier, O. A. (2013). Relación entre los indicadores  
de disponibilidad de fósforo y la respuesta de los cultivos de trigo, maíz y soja a la  
inoculación con *Penicillium bilaii*. *Agriscientia*, 30(2), 49–56. Retrieved from  
[http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1668-298X2013000200001&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1668-298X2013000200001&script=sci_arttext)
- Simpson, R., Oberson, A., Culvenor, R., Ryan, M., Veneklaas, E., Lambers, H., ...  
Richardson, A. (2011). Strategies and agronomic interventions to improve the  
phosphorus-use efficiency of farming systems. *Plant and Soil*, 349(89–120).  
<https://doi.org/10.1007/s11104-011-0880-1>
- Smeck, N. E. (1985). Phosphorus Dynamics in Soils and Landscapes. *Geoderma*, 36,  
185–199.

- Snowdon, P. (1985). Effects of Fertilizer and Family on the Homogeneity of Biomass Regressions for Young Pinus-Radiata. *Australian Forest Research*, 15, 135–140.
- Snowdon, P., & Benson, M. L. (1992). Effects of Combinations of Irrigation and Fertilization on the Growth and Aboveground Biomass Production of Pinus- Radiata. *Forest Ecology and Management*, 52, 87–116.
- Soinne, H. (2009). *Pro Terra Pro Terra*. University of Helsinki.
- Solomon, D., Lehmann, J., Mamo, T., Fritzsche, F., & Zech, W. (2002). Phosphorus forms and dynamics as influenced by land use changes in the sub-humid Ethiopian highlands. *Geoderma*, 105(1–2), 21–48. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00090-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00090-8)
- Stape, J. L., Binkley, D., & Ryan, M. G. (2008). Production and carbon allocation in a clonal Eucalyptus plantation with water and nutrient manipulations. *Forest Ecology and Management*, 255(3–4), 920–930. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.085>
- Syers, J. K., Johnston, a. E., & Curtin, D. (2008). Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin*, 18, 1–108. <https://doi.org/10.1017/S0014479708007138>
- Takahashi, T., & Shoji, S. (2002). Distribution and classification of volcanic ash soils. *Global. Environ. Res.*, 6(2), 83–97. Retrieved from <http://ns.airies.or.jp/publication/ger/pdf/06-2-10.pdf>
- Team, R. (2016). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from <https://www.r-project.org>
- Tesfaye, M., Dufault, N. S., Dornbusch, M. R., Allan, D. L., Vance, C. P., & Samac, D. A. (2003). Influence of enhanced malate dehydrogenase expression by alfalfa on diversity of rhizobacteria and soil nutrient availability. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(8), 1103–1113. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00162-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00162-7)
- Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55–94.
- Tiessen, H., Salcedo, I. H., & Sampaio, E. V. S. B. (1992). Nutrient and soil organic matter dynamics under shifting cultivation in semi-arid northeastern Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 38(3), 139–151. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(92\)90139-3](https://doi.org/10.1016/0167-8809(92)90139-3)

- Tiessen, H., & Shang, C. (1998). Organic Matter turnover in Tropical Land Use System. In L. Bergström & H. Kirchmann (Eds.), *Carbon and nutrient dynamics in natural and agricultural tropical ecosystems* (pp. 1–14). Oxford University Press.
- Toal, M., Yeomans, C., Killham, K., & Meharg, A. A. (2000). A review of rhizosphere carbon flow modelling. *Plant and Soil*, 222(1–2), 263–281.  
<https://doi.org/10.1023/A:1004736021965>
- Turnbull, C. R. A., Beadle, C. L., West, P. W., & Cromer, R. N. (1994). Copper deficiency a probable cause of stem deformity in fertilised *Eucalyptus nitens*. *Canadian Journal Forest Research*, 24, 1434–1439.
- Turnbull, T. L., Warren, C. R., & Adams, M. A. (2007). Novel mannose-sequestration technique reveals variation in subcellular orthophosphate pools do not explain the effects of phosphorus nutrition on photosynthesis in *Eucalyptus globulus* seedlings. *New Phytologist*, 176(4), 849–861. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02229.x>
- Turner, B. L., & Condon, L. M. (2013). Pedogenesis, nutrient dynamics, and ecosystem development: The legacy of T.W. Walker and J.K. Syers. *Plant and Soil*, 367(1–2), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1750-9>
- Turner, J., & Lambert, M. . (1996). Nutrient cycling and forest management. In P. M. Attiwill & M. . Adams (Eds.), *Nutrition of Eucalypts* (pp. 391–396). Melbourne, Australia: CSIRO.
- Uhde-Stone, C., Gilbert, G., Johnson, J. M.-F., Litjens, R., E. Zinn, K., Temple, S. J., ... Allan, D. L. (2003). Acclimation of white lupin to phosphorus deficiency involves enhanced expression of genes related to organic acid metabolism. *Plant and Soil*, 248(1/2), 99–116. <https://doi.org/10.1023/A:1022335519879>
- Uhde-Stone, C., Zinn, K., Ramirez-Yáñez, M., Li, A., Vance, C., & Allan, D. (2003). Nylon Filter Arrays Reveal Differential Gene Expression in Proteoid Roots of White Lupin in Response to Phosphorus Deficiency. *Plant Physiology*, 131(3), 1064–1079.  
<https://doi.org/10.1104/pp.102.016881>
- Vance, C. P., Uhde-Stone, C., & Allan, D. L. (2003). Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, 157(3), 423–447. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x>
- Viera, M., Bonacina, D. M., Schumacher, M. V., Calil, F. N., Caldeira, M. V. W., & Watzlawick, L. F. (2012). Biomassa e nutrientes em povoamento de *Eucalyptus urograndis* na Serra do Sudeste-RS. *Semina:Ciencias Agrarias*, 33(SUPPL.1),

- 2481–2490. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33Supl1p2481>
- Walker, D. A., & Robinson, S. . (1978). Chloroplast and cell. A contemporary view of photosynthetic carbon assimilation. *Ber. Deutsch. Bot. Ges. Bd*, 91, 513–526.
- Walker, T. W., & Syers, J. K. (1976). The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, 15(1), 1–19. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(76\)90066-5](https://doi.org/10.1016/0016-7061(76)90066-5)
- Wang, E., Bell, M., Luo, Z., Moody, P., & Probert, M. E. (2014). Modelling crop response to phosphorus inputs and phosphorus use efficiency in a crop rotation. *Field Crops Research*, 155, 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.09.015>
- Wang, H., & Zhou, W. (1996). Fertilizer and Eucalypt Plantations in China. In A. P.M & M. A. Adams (Eds.), *Nutrition of Eucalypts* (pp. 391–396). Australia: CSIRO.
- Wang, Y. T., Zhang, T. Q., O'Halloran, I. P., Tan, C. S., & Hu, Q. C. (2016). A phosphorus sorption index and its use to estimate leaching of dissolved phosphorus from agricultural soils in Ontario. *Geoderma*, 274, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.04.002>
- Watmuff, G., Reuter, D. J., & Speirs, S. D. (2013). Methodologies for assembling and interrogating N, P, K, and S soil test calibrations for Australian cereal, oilseed and pulse crops. *Crop and Pasture Science*, 64(5), 424–434. <https://doi.org/10.1071/CP12424>
- Xu, D., Dell, B., Gong, M., Malajczuk, N., & Wang, Z. (2005). Effects of phosphorus fertilization and ectomycorrhizal fungal inoculation on productivity and nutrient accumulation of Eucalyptus globulus plantation. *Journal of Tropical Forest Science*, 17(3), 447–461. Retrieved from [http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&CSC=Y&NEWS=N&PAGE=fulltext&D=caba5&AN=20043068718http://ucelinks.cdlib.org:8888/sfx\\_local?sid=OVID:cabadb&issn=1001-1498&isbn=&volume=17&issue=1&spage=26&date=2004&title=Forest+Research%2C+Beijing&atitle=Effects+of+](http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&CSC=Y&NEWS=N&PAGE=fulltext&D=caba5&AN=20043068718http://ucelinks.cdlib.org:8888/sfx_local?sid=OVID:cabadb&issn=1001-1498&isbn=&volume=17&issue=1&spage=26&date=2004&title=Forest+Research%2C+Beijing&atitle=Effects+of+)
- Xu, D., Dell, B., Malajczuk, N., & Gong, M. (2001). Effects of P fertilisation and ectomycorrhizal fungal inoculation on early growth of eucalypt plantations in southern China. *Plant and Soil*, 233(1), 47–57. <https://doi.org/10.1023/A:1010355620452>
- Zamuner, E. C., Picone, L. I., & Echeverria, H. E. (2008). Organic and inorganic

- phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices. *Soil and Tillage Research*, 99(2), 131–138. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2007.12.006>
- Zapata, M. (2011). *Fractovolumen*. Yumbo, Valle: Smurfit Kappa Colombia.
- Zapata D. Claudia. (2013). *Influencia edafoclimática en el desarrollo de plantaciones juveniles de Eucalyptus grandis en el suroccidente colombiano*. Pdf. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira.
- Zhang, B., Fang, F., Guo, J., Chen, Y., Li, Z., & Guo, S. (2012). Phosphorus fractions and phosphate sorption-release characteristics relevant to the soil composition of water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir. *Ecological Engineering*, 40, 153–159. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.12.024>