# 7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

## Gestión del monte: servicios ambientales y bioeconomía

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-232

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
**Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017**
**ISBN 978-84-941695-2-6**
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Sociedad Española de Ciencias Forestales
SECF

# Fraccionamiento del aluminio en la fase sólida de suelos con masas adultas de *Pinus pinaster*: relación con el material de partida y la profundidad del suelo

EIMIL FRAGA, C.[1], RODRÍGUEZ SOALLEIRO, R.[1] FERNÁNDEZ SANJURJO, M.J.[2] y ÁLVAREZ RODRÍGUEZ, E.[2]

[1] Unidad de Gestión Forestal Sostenible. Departamento de Producción Vegetal y Proyectos de Ingeniería. Universidad de Santiago de Compostela.
[2] Departamento de Ciencias del Suelo y Química Agrícola. Universidad de Santiago de Compostela.

## Resumen

En 21 parcelas adultas de *Pinus pinaster* en Galicia se estudió la influencia del material de partida en las fracciones de Al en la fase sólida del suelo y en el Al total en disolución. Las parcelas están asentadas sobre: granito, rocas metamórficas ácidas y sedimentos, y se tomaron muestras a dos profundidades distintas en el suelo (0-20 y 20-40 cm). Se estimaron las siguientes formas de Al: Al total no cristalino ($Al_o$); Al total ligado orgánicamente ($Al_p$); complejos órgano-alumínicos de baja-media estabilidad ($Al_{cu}$) y Al cambiable ($Al_{NH4}$). Se estimaron los complejos órgano-alumínicos de alta estabilidad ($Al_{p-cu}$); y los de estabilidad media-baja ($Al_{cu-NH4}$). El pH es ácido en todas las muestras ($pH_{H2O}$ entre 4,24 y 5,12), y sigue la secuencia: granitos>rocas metamórficas ácidas>sedimentos, con menores valores en la capa más superficial. $Al_p$ es mayor que $Al_o$, indicando un predominio de complejos órgano-alumínicos sobre compuestos inorgánicos de baja cristalinidad. En condiciones de mayor pH y más baja relación C/N (suelos sobre granito y en la capa de 20-40 cm para todos los suelos) se favorece la formación de $Al_{p-cu}$, representando más del 60% del $Al_p$. Por el contrario, en condiciones más ácidas (suelos sobre rocas metamórficas ácidas y sedimentos y en la capa superficial de todos los suelos) disminuyen los complejos órgano-alumínicos de mayor estabilidad y aumentan las formas más lábiles ($Al_{NH4}$ y Al total). Los resultados parecen indicar que en las condiciones más ácidas las formas órgano-alumínicas se desestabilizan liberando Al a la disolución.

## Palabras clave

Suelos ácidos, relación C/N, complejos organoalumínicos, Al en disolución, litología

## 1. Introducción

Los suelos de Galicia se caracterizan por ser ácidos y con bajas concentraciones de Ca, Mg y K cambiable y alta saturación de Al del complejo de intercambio catiónico (Macías y Calvo, 1992). Esto se debe fundamentalmente al predominio de rocas ácidas y elevadas precipitaciones. Los suelos son también pobres en P disponible debido sobre todo a procesos de fijación por diferentes compuestos de Fe y Al que abundan en estos suelos. Otra característica de estos suelos son los altos contenidos de materia orgánica, que muestran una alta capacidad complejante, particularmente hacia el Al. Los procesos geoquímicos dan lugar a la formación de compuestos de Al altamente reactivos y aluminio-silicatos (incluyendo compuestos órgano-alumínico), principalmente en sistemas con un rango de pH entre 4 y 5,5 (García-Rodeja et al, 1985). La formación de complejos Al-humus tiene como consecuencia la estabilización de la materia orgánica y conlleva la disminución de la toxicidad de Al (Grand y Lavkulich, 2011, Matús et al, 2006). Esto puede explicar la falta de efectos negativos del Al sobre el crecimiento de especies arbóreas sobre suelos ácidos.

Los diferentes factores relacionados con la formación del suelo pueden influir en la presencia de diferentes formas de Al. Ciertas especies, principalmente coníferas, acidifican el suelo y están asociadas con procesos de degradación, particularmente en regiones frías (Augusto et al, 1998). Por el contrario, en otras áreas la vegetación puede ser un factor secundario en la formación del suelo, subordinado por el clima y el material de partida. El efecto del material de partida es particularmente claro cuando otros factores que forman el suelo (clima, topografía o edad) son muy similares en todos los paisajes. En tales casos, el material de partida se convierte en la principal causa de variación de

los tipos de suelo, lo que puede a su vez determinar los procesos del suelo y la dinámica de nutrientes (Binkley et al, 1995). Entre los materiales más abundantes en Galicia destacan los esquistos y pizarras, que constituyen aproximadamente un 46% y los granitos y rocas afines que representan un porcentaje similar (45%), quedando el resto repartido entre rocas básicas y ultrabásicas y los depósitos terciarios y cuaternarios (Macías et al, 1982).

## 2. Objetivos

En este trabajo evaluamos las propiedades químicas de suelos forestales de Galicia, en concreto plantaciones adultas de *Pinus pinaster*, centrándonos en el estudio de la especiación de Al en la fase sólida. Se compararán los resultados obtenidos sobre diferentes materiales de partida, utilizando dos profundidades del suelo.

## 3. Metodología

El estudio se llevó a cabo en una red de 21 parcelas establecidas sobre repoblaciones adultas de *Pinus pinaster* en Galicia. Las parcelas están asentadas sobre diferentes materiales de partida: granito, rocas metamórficas ácidas y sedimentos. En estas parcelas se tomaron muestras de suelo a dos profundidades (0-20 y 20-40 cm) en las que se hicieron análisis químicos en la fase sólida y en la disolución del suelo.

Las muestras se secaron a 40ºC y se tamizaron a través de un tamiz de 2 mm. En la fracción sólida del suelo se hicieron las siguientes determinaciones: pH en agua y pH en KCl 0,1 M (Guitián y Carballas, 1976); C total, N y S con un autoanalizador LECO CNS-2000; los cationes cambiables se desplazaron con $NH_4Cl$ (Peech et al, 1947) y se determinaron por espectofotometría de absorción atómica; la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe) se determina por la suma de Ca, Mg, Na, K y Al (Kamprath, 1970); se calculó la saturación de Al (%Al) y P disponible se determinó según Olsen y Sommers (1982).

Las diferentes formas de aluminio se extrajeron de la fracción sólida del suelo por una extracción no secuencial con diferentes reactivos. Las fracciones fueron extraídas con oxalato amónico, pirofosfato sódico, $CuCl_2$ 0,5 M y $NH_4Cl$. En los extractos se determinó el Al por espectofotometría de absorción atómica. El Al extraído por oxalato amonio ($Al_o$) proporciona una estimación del Al total no cristalino (Blakemore, 1978); la extracción con pirofosfato sódico (Bascomb, 1968) da una estimación del Al ligado orgánicamente ($Al_p$); la extracción con $CuCl_2$ 0,5 M (Juo y Kamprath, 1979) proporciona una estimación de los complejos órgano-alumínicos de baja y media estabilidad ($Al_{cu}$). El Al extraído con $NH_4Cl$ es el Al de cambio ($Al_{NH4}$). Sustrayendo $Al_{cu}$ de $Al_p$ ($Al_{p-cu}$) obtenemos una estimación del Al que forma complejos de alta estabilidad con la materia orgánica (Urrutia et al, 1988) y sustrayendo $Al_{NH4}$ de $Al_{cu}$ ($Al_{cu-NH4}$) se tiene una estimación de los complejos de estabilidad media y baja.

La disolución del suelo se obtuvo mediante un extracto acuoso (proporción suelo: solución 1:10). El extracto se filtró (0,45 µm) y se determinó el Al total en disolución por espectofotometría visible, después de aplicar el método del pirocatecol-violeta.

Se realizaron análisis estadísticos simples, obteniéndose coeficientes de correlación lineal y ANOVA de una vía con clasificación de medias por Duncan, empleando el paquete estadístico SAS (Sas Institute, 2004).

## 4. Resultados

### Parámetros generales del suelo

Considerando los distintos materiales de partida, en la Tabla 1 se observan diferencias significativas ($p<0,01$) para el $pH_{H2O}$ y $pH_{KCl}$ en ambas profundidades, siendo más elevados en suelos sobre granitos y más bajo en sedimentos. El %Al también presenta diferencias significativas entre materiales en las dos profundidades ($p<0,05$), siguiendo una tendencia opuesta al pH. El %Al se

correlacionó negativa y significativamente ($p<0,001$) con el $pH_{H2O}$ y $pH_{KCl}$ ($r=-0,59$ y $r=-0,60$ respectivamente). Para el resto de parámetros las diferencias que existen entre materiales no son significativas. Las parcelas asentadas sobre sedimentos presentaron más cantidad de materia orgánica y mayor relación C/N que los suelos desarrollados sobre los otros materiales de partida en ambas profundidades (Tabla 1). El C orgánico se correlacionó significativa ($p<0,001$) y negativamente con el $pH_{H2O}$ y $pH_{KCl}$ ($r=-0,68$ y $r=-0,69$ respectivamente). En cuanto a los cationes cambiables, los suelos sobre rocas metamórficas ácidas presentan mayores contenidos de Mg y K, mientras en granitos se obtienen los niveles más altos de Ca y en sedimentos los más altos de Na. Las parcelas sobre sedimentos presentan mayor CICe y %Al (>85%) para ambas profundidades (Tabla 1). Considerando todas las muestras conjuntamente la CICe se correlacionó positivamente con el contenido de C ($r=0,92$, $p<0,001$). La concentración de P disponible es escasa en todos los casos, siendo más elevada en suelos sobre sedimentos y más baja sobre rocas metamórficas ácidas en las dos profundidades, con concentraciones entre 4 y 11 mg $kg^{-1}$ (Tabla 1).

En relación a las diferencias según la profundidad, en los suelos sobre granitos se observaron diferencias significativas ($p<0,01$) en el $pH_{H2O}$ y $pH_{KCl}$, siendo más elevado a mayor profundidad. En los cationes de cambio también se observan diferencias significativas ($p<0,05$) en ambas profundidades para Ca, Mg y K; en todos los casos, las concentraciones son superiores en la capa superficial. Esta capa presenta los mayores valores de P, C, N y relación C/N, aunque estas diferencias no son significativas entre profundidades (Tabla 1). En los suelos sobre rocas metamórficas ácidas el pH sigue la misma tendencia entre profundidades a lo comentado para granitos pero las diferencias no son significativas. También se observaron mayores concentraciones de los cationes de cambio en la capa superficial, aunque solo hay diferencias significativas ($p<0,01$) entre profundidades en Ca y Mg. Finalmente en los sedimentos se observan tendencias similares a los otros materiales, encontrando diferencias significativas ($p<0,05$) entre las dos profundidades para Mg, K, P y C (Tabla 1).

## Fracciones de Al en la fase sólida y Al total en la disolución del suelo

Todas las formas de Al complejadas orgánicamente son en general más elevadas en los suelos sobre granitos para ambas profundidades; en rocas metamórficas ácidas y en sedimentos las concentraciones de estas formas son similares. La concentración de $Al_p$ (varió entre 9266,0 y 4863,0 mg $kg^{-1}$) fue más alta que la de $Al_o$ (varió entre 3890,8 y 6978,0 mg $kg^{-1}$) en todas las parcelas, como es frecuente en suelos que tienen altos niveles de materia orgánica (Figura 1). La correlación entre ambas fracciones de Al también fue positiva y muy significativa ($r=0,93$, $p<0,001$). Los valores de $Al_p$ son significativamente ($p<0,05$) más altos en granito que en rocas metamórficas ácidas (Figura 1). $Al_p$ también se correlacionó significativa ($p<0,01$) y positivamente con el $pH_{H2O}$ y $pH_{KCl}$ ($r=0,44$ y $r=0,42$ respectivamente).

La concentración de los complejos órgano-alumínicos de baja y media estabilidad ($Al_{cu}$) alcanzó valores entre 2098,2 y 1287,0 mg $kg^{-1}$ en las dos profundidades (Figura 1). El $Al_{cu}$ se correlacionó positiva y significativamente con el C ($r=0,74$, $p<0,001$).

El Al del complejo de cambio ($Al_{NH4}$) varió entre 914,1 y 486,9 mg $kg^{-1}$, con mayores concentraciones en suelos sobre sedimentos, seguido de rocas metamórficas ácidas y granito, para ambas profundidades, aunque las diferencias no son significativas (Tabla 2). Considerando todas las muestras el $Al_{NH4}$ se correlacionó significativa ($p<0,001$) y negativamente con el $pH_{H2O}$ ($r=-0,72$) y con el $pH_{KCl}$ ($r=-0,60$) y positivamente con el C ($r=0,92$), con la relación C/N ($r=0,51$) y con $Al_{cu}$ ($r=0,74$).

La valores de los complejos órgano-alumínicos de alta estabilidad ($Al_{p-cu}$) variaron entre 3108,0 y 7247,1 mg $kg^{-1}$ siendo significativamente ($p<0,05$) más elevada en suelos sobre granitos para ambas profundidades (Figura1). $Al_{p-cu}$ representa entre 61 y 72% del $Al_p$ para la capa más superficial de todos los suelos y entre el 72% y el 78% para la más profunda. La fracción $Al_{p-cu}$ se correlacionó significativa ($p<0,001$) y positivamente con el $pH_{H2O}$ (Figura 2a) y $pH_{KCl}$ ($r=0,58$ y $r=0,57$) y también con $Al_p$ ($r=0,96$).

Los complejos órgano-alumínicos de estabilidad media y baja ($Al_{cu-NH4}$) alcanzaron valores entre 771,0 y 1532,2 mg $kg^{-1}$ siendo más altos en parcelas sobre granitos, aunque no hay diferencias

significativas (Figura 1). $Al_{cu\text{-}NH4}$ representa entre 56 y 68% del $Al_{cu}$ para la capa más superficial de todos los suelos y entre el 60% y el 76% para la más profunda Estos complejos se correlacionaron significativa ($p<0,01$) y positivamente con el C orgánico ($r=0,50$) y con $Al_p$ ($r=0,79$).

La concentración de Al total en disolución varió entre 5,85 y 17,42 mg $L^{-1}$ y sigue la misma secuencia que para el $Al_{NH4}$ (sedimentos> rocas metamórficas ácidas> granitos), (Tabla 2). El Al total se correlaciona significativa ($p<0,001$) y positivamente con el contenido de C orgánico ($r=0,70$), la relación C/N ($r=0,47$) (Figura 2b), $Al_{NH4}$ ($r=0,80$) y $Al_{cu}$ ($r=0,48$), sin embargo, la correlación es negativa ($p<0,001$) con el $pH_{H2O}$ y $pH_{KCl}$ ($r=-0,58$ y $r=-0,59$ respectivamente) y $Al_{p\text{-}cu}$ ($r=-0,33$, $p<0,05$).

Teniendo en cuenta las diferencias según la profundidad observamos que la mayoría de las fracciones presentan valores similares o más altos a mayor profundidad, excepto en el caso de $Al_{NH4}$ y Al total que fueron más elevados en la profundidad de 0-20 cm. Sin embargo, solo se observan diferencias significativas para $Al_{p\text{-}cu}$ ($p<0,005$) con valores más altos a mayor profundidad en granitos y para el Al total en disolución ($p<0,001$) que, contrariamente, presentó valores más bajos en la capa más profunda en granitos y en sedimentos (Figura 1, Tabla 2).

## 5. Discusión

Todos los suelos estudiados fueron ácidos, ricos en materia orgánica y contienen niveles de Ca, Mg y K de bajos a intermedios, siguiendo los criterios de Bonneau (1995), con concentraciones más elevadas en la capa superficial. Todas las parcelas presentan un marcado carácter álico, con un %Al siempre mayor de 79% (Buol et al, 1975).

En todas las parcelas la secuencia de las distintas formas de Al es la siguiente: $Al_p$> $Al_o$> $Al_{cu}$> $Al_{NH4}$. Concentraciones de $Al_p$ más altas que las de $Al_o$ también se encontraron en otros suelos de Galicia (Álvarez et al, 2010; Ferro-Vázquez et al, 2014). Los autores atribuyen esto al predominio de los complejos órgano-alumínicos dentro del Al no cristalino y la posible extracción de formas inorgánicas por el pirofosfato, especialmente las fases $Al(OH)_3$ de baja cristalinidad y Al del espacio interlaminar de las arcillas.

Los complejos órgano-alumínicos de alta estabilidad ($Al_{p\text{-}cu}$) predominan sobre los complejos de media y baja estabilidad ($Al_{cu}$) en todos los materiales estudiados, tal y como se encuentra frecuentemente en suelos de Galicia (Álvarez et al, 2002; Eimil-Fraga et al, 2015). En este estudio, las parcelas sobre granitos son las que presentan la menor acidez y el mayor grado de humificación de la materia orgánica (relación C/N baja), simultáneamente con la mayor concentración de complejos órgano-alumínicos de fuerte estabilidad ($Al_{p\text{-}cu}$). La relación entre el grado de acidez y la formación de complejos órgano-alumínicos de mayor estabilidad se corrobora con la correlación positiva obtenida entre $Al_{p\text{-}cu}$ con el pH. En cambio, estos complejos tienden a disminuir y el Al cambiable y el Al total en disolución a aumentar en situaciones más ácidas y donde existe mayor relación C/N, condiciones que se dan especialmente en suelos sobre sedimentos. Esto está en consonancia con la correlación negativa obtenida entre el $Al_{NH4}$ con el pH y positiva con la relación C/N. La baja reactividad de la materia orgánica puede favorecer el incremento de $Al_{NH4}$ y Al total a expensas de las formas más estables.

Resultados similares a estos se pueden observar si comparamos las dos profundidades en todos los suelos. Así, en la capa superficial con mayor acidez y menor grado de humificación de la materia orgánica, son más abundantes las formas de Al cambiable y Al total en disolución, mientras que en la capa inferior con menor acidez, la mayor reactividad de la materia orgánica favorece las formas de Al complejadas orgánicamente de fuerte estabilidad. Ferro-Vázquez et al (2014) también observaron una influencia del pH en la formación de complejos altamente estables en suelos podsólicos. Los resultados apoyan la idea de que la inmovilización y la estabilidad de los compuestos Al-humus son dependientes del pH. Nóvoa-Muñoz y García-Rodeja Gayoso (2007) encontraron una importante contribución de las fracciones de estabilidad alta al Al disuelto después de la acidificación. En este estudio, el descenso en los complejos órgano-alumínicos altamente estables y el incremento de $Al_{NH4}$ y Al total a medida que desciende el pH del suelo, parece confirmar la idea de que las formas órgano-alumínicas son desestabilizadas en las condiciones de mayor acidez provocando un incremento del Al cambiable y del presente en la disolución del suelo.

## 6. Conclusiones

Tanto el material de partida como la profundidad influyen significativamente en ciertos parámetros de los suelos estudiados. En cuanto a las diferentes formas de Al, los complejos órgano-alumínicos predominan sobre los compuestos inorgánicos de baja cristalinidad en todos los suelos. En las parcelas sobre granito, con la menor acidez y la menor relación C/N, presenta las mayores concentraciones de Al oxalato y de las formas de Al complejadas orgánicamente ($Al_p$), especialmente los complejos de fuerte estabilidad. En los suelos, sobre rocas metamórficas ácidas y, especialmente sobre sedimentos, donde el pH es más bajo y la relación C/N más elevada, aumenta el Al en forma más lábil (cambiable y en disolución), observándose una disminución de las formas más estables complejadas con la materia orgánica. Resultados similares se pueden encontrar cuando comparamos las dos profundidades; la capa superficial (0-20 cm), más ácida y con menor relación C/N presenta menos complejos órgano-alumínicos y más Al en forma lábil que la capa más profunda (20-40 cm). Parece que las condiciones de mayor acidez conllevan una menor reactividad de la materia orgánica, desestabilizando los complejos órgano-alumínicos y favoreciendo la presencia de Al en el complejo de cambio y en la disolución de los suelos.

## 7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Xunta de Galicia: Programa de Consolidación y Estructuración de Unidades de Investigación Competitiva. Grupos de Referencia Competitiva. GRC2014/015.

## 8. Bibliografía

ÁLVAREZ, E.; MONTERROSO, C.; FERNÁNDEZ MARCOS, M.L.; 2002. Aluminium fractionation in Galicia (NW Spain) forest soils as related to vegetation and parent material. For. Ecol. Manag. 166, 193–206.

ÁLVAREZ, E.; FERNÁNDEZ-SANJURJO, M.; OTERO, X.L.; MACÍAS, F.; 2010. Aluminium geochemistry in the bulk and rhizospheric soil of the species colonising an abandoned copper mine in Galicia (NW Spain). J. Soils Sediments 10, 1236–1245.

AUGUSTO, L.; BONNAUD, P.; RANGER, J.; 1998. Impact of trees species on forest soil acidification. For. Ecol. Manag. 105, 67–78.

BASCOMB, C.L.; 1968. Distribution of pyrophosphate extractable iron and organic carbon in soils of various groups. J. Soil Sci. 19, 251–256.

BINKLEY, D.; SUAREZ, F.; RHOADES, C.; STOTTLEMYER, R.; VALENTINE, D.W.; 1995. Parent material depth controls ecosystem composition and function on a riverside terrace in northwestern Alaska. Ecoscience 2, 377–381.

BLAKEMORE, L.D.; 1978. Exchange complex dominated by amorphous material (ECDAM). En: SMITH, G.D. (eds.): The Andisol Proposal. 21p. Soil Bureau, DSIR, New Zealand.

BONNEAU, M.; 1995. Fertilisation des forêsts dans les pays tempérés. 367p. ENGREF, Nancy.

BUOL, S.W.; SANCHEZ, P.A.; CATE, R.B.; GRANGER, M.A.; 1975. Soil fertility capability classification for fertility management. En: BORNEMISZA, E.; ALVARADO, A. (eds.): Soil Management in Tropical America. 126–145. North Carolina State Univ. USA.

EIMIL-FRAGA, C.; ÁLVAREZ-RODRÍGUEZ, E.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.; FERNÁNDEZ-SANJURJO, M.J.; 2015. Influence of parent material on the aluminium fractions in acidic soils under *Pinus pinaster* in Galicia (NW Spain). Geoderma 255-256, 50-57.

FERRO-VÁZQUEZ, C.; NÓVOA-MUÑOZ, J.C.; COSTA-CASAIS, M.; KLAMINDER, J.; MARTÍNEZ-CORTIZAS, A.; 2014. Metal and organic matter immobilization in temperate podzols: a high resolution study. Geoderma 217–218, 225–234.

GARCÍA-RODEJA, E.; MACÍAS, F.; GUITIÁN, F.; 1985. Reacción con el NaF de los suelos de Galicia. V. Relación con el material de partida y los procesos de edafogénesis. An. Edafol. Agrobiol. 44, 357–368.

GRAND, S.; LAVKULICH, L.M.; 2011. Depth distribution and predictors of soil organic carbon in podzols of a forested watershed in southwestern Canada. Soil Sci. 176 (4), 164–174.

GUITIÁN, F.; CARBALLAS, M.T.; 1976. Técnicas de análisis de suelos. 288p. Pico Sacro: Santiago de Compostela.

JUO, A.S.; KAMPRATH, E.J.; 1979. Copper chloride as an extractant for estimating the potentially reactive aluminum pool in acid soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 43, 35–38.

KAMPRATH, E.J.; 1970. Exchangeable aluminium as a criterion for liming leached mineral soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 34, 252–254.

MACÍAS, F.; CALVO DE ANTA, R.; GARCÍA, C.; GARCÍA-RODEJA, E.; SILVA, B.; 1982. El material original: su formación e influencia en las propiedades de los suelos de Galicia. An. Edafol. Agrobiol. 41, 1747–1768.

MACÍAS, F.; CALVO, R.; 1992. Suelos de la provincia de La Coruña. 85p. Diputación de La Coruña, La Coruña.

MATÚS, P.; KUBOVA, J.; BUJDOS, M.; MEDVED, J.; 2006. Free aluminium extraction from various reference materials and acid soils with relation to plant availability. Talanta 70, 996–1005.

NÓVOA-MUÑOZ, J.C.; GARCÍA-RODEJA GAYOSO, E.; 2007. Modification of soil solid aluminium phases during an extreme experimental acidification of A horizons of forest soils from Southwest Europe. Water Air Soil Pollut: Focus. 7, 235–239.

OLSEN, S.R.; SOMMERS, L.E.; 1982. Phosphorus. En: PAGE, A.L.; MILLER, R.H.; KEENEY, D.R.; (eds.): Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties. 1159p. EEUU, Madison, WI.

PEECH, L.; ALEXANDER, L.T.; DEAN, L.A.; 1947. Methods of Soil Analysis for Soil Fertility Investigations. UDA Cir. Nº 757. US Government Printing Office, Washington.

SAS INSTITUTE INC.; 2004. SAS STAT® User's Guide. SAS Institute. Inc., Cary, NC.

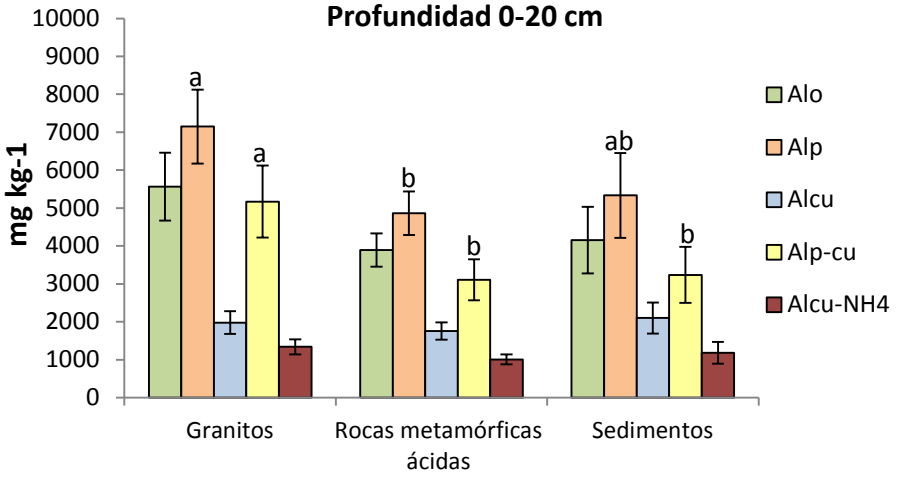
URRUTIA, M.; MACÍAS, F.; GARCÍIA-RODEJA, E.; 1995. Evaluación del $CuCl_2$ y del $LaCl_3$ como extractantes de aluminio en suelos ácidos de Galicia. Nova Acta Cient. Compostel. 5, 173.

*Tabla 1. Valores medios de los parámetros generales en relación a la profundidad dentro de cada material de partida. Las letras minúsculas distintas corresponden a la clasificación de medias según el test de Duncan entre profundidades dentro de cada material de partida y las letras mayúsculas distintas corresponden a las diferencias entre materiales de partida dentro de cada profundidad.*

| | Profundidad (cm) | Granitos | Rocas metamórficas ácidas | Sedimentos |
|---|---|---|---|---|
| $pH_{H2O}$ | 0-20 | 4,80 b A | 4,58 a AB | 4,24 a B |
| | 20-40 | 5,12 a A | 4,95 a A | 4,59 a B |
| $pH_{KCl}$ | 0-20 | 4,02 b A | 3,86 a AB | 3,50 a B |
| | 20-40 | 4,30 a A | 4,24 a A | 3,84 a B |
| C (g $kg^{-1}$) | 0-20 | 73,91 a | 75,08 a | 99,43 a |
| | 20-40 | 55,71 a | 44,54 a | 60,42 b |
| N (g $kg^{-1}$) | 0-20 | 3,35 a | 3,08 a | 4,05 a |
| | 20-40 | 2,78 a | 2,04 a | 2,82 a |
| C/N | 0-20 | 22,09 a | 23,82 a | 25,02 a |
| | 20-40 | 19,87 a | 21,59 a | 22,18 a |
| Ca (cmol(+) $kg^{-1}$) | 0-20 | 0,60 a | 0,53 a | 0,44 a |
| | 20-40 | 0,23 b | 0,25 b | 0,29 a |
| Mg (cmol(+) $kg^{-1}$) | 0-20 | 0,20 a | 0,24 a | 0,20 a |
| | 20-40 | 0,12 b | 0,12 b | 0,12 b |
| Na (cmol(+) $kg^{-1}$) | 0-20 | 0,55 a | 0,57 a | 0,64 a |
| | 20-40 | 0,52 a | 0,55 a | 0,54 a |
| K (cmol(+) $kg^{-1}$) | 0-20 | 0,14 a | 0,17 a | 0,15 a |
| | 20-40 | 0,11 b | 0,12 a | 0,10 b |
| CICe (cmol(+) $kg^{-1}$) | 0-20 | 9,06 a | 9,81 a | 11,98 a |
| | 20-40 | 6,61 a | 7,02 a | 8,64 a |
| %Al | 0-20 | 79,78 a B | 81,21 a AB | 85,52 a A |
| | 20-40 | 79,82 a B | 80,06 a B | 86,44 a A |
| P (mg $kg^{-1}$) | 0-20 | 8,76 a | 7,30 a | 10,86 a |
| | 20-40 | 5,57 a | 4,11 a | 6,73 b |

*Tabla 2. Valores medios del Al cambiable (AlNH4) y Al total en disolución en relación a la profundidad dentro de cada material de partida*

| | Profundidad (cm) | Granitos | Rocas metamórficas ácidas | Sedimentos |
|---|---|---|---|---|
| $Al_{NH4}$ (mg $kg^{-1}$) | 0-20 | 641,1 | 746,7 | 914,1 |
| | 20-40 | 486,8 | 516,0 | 610,9 |
| Al total (mg $L^{-1}$) | 0-20 | 13,1 | 15,79 | 17,42 |
| | 20-40 | 5,85 | 8,35 | 8,1 |



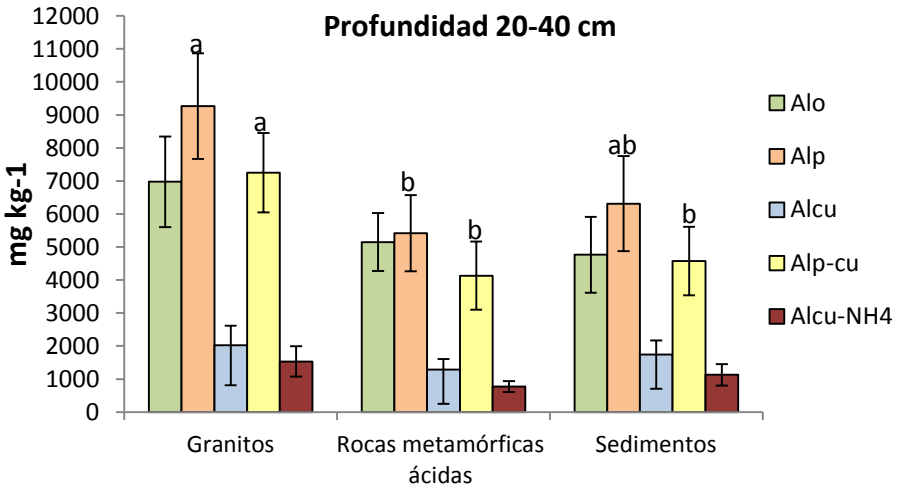



*Figura 1. Valores medios y desviación estándar (barras de error) para el Al extraído con ácido oxalato amonio ($Al_o$), pirofosfato sódico ($Al_p$) y $CuCl_2$ ($Al_{cu}$), $Al_{p-cu}$=$Al_p$-$Al_{cu}$, $Al_{cu-NH4}$= $Al_{cu}$-$Al_{NH4}$ en relación al tipo de material de partida. Las letras minúsculas corresponden a la clasificación de medias según el test de Duncan.*

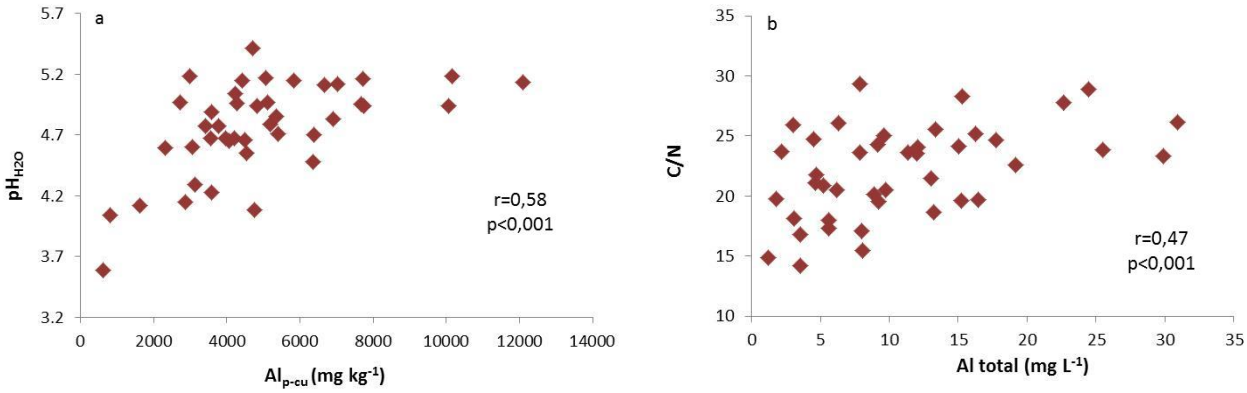



*Figura 2. Relación entre los complejos órgano-alumínicos de fuerte estabilidad ($Al_{p-cu}$) y el $pH_{H2O}$ (a) y relación entre el Al total de la disolución (Al total) y el C/N (b).*