

## Influencia del hierro y aluminio en el contenido de materia orgánica del suelo

M.T. BARRAL, M. ARIAS & F. DÍAZ-FIERROS

*Departamento de Edafología e Química Agrícola. Facultad de Farmacia  
Universidad de Santiago. 15706 Santiago de Compostela*

*(Recibido, julio de 1996. Aceptado, octubre de 1996)*

### Resumen

BARRAL, M.T., ARIAS, M. & DÍAZ-FIERROS, F. (1997). Influencia del hierro y aluminio en el contenido de materia orgánica del suelo. *Nova Acta Científica Compostelana (Biología)*, 7: 137-146

El contenido de materia orgánica del suelo tiende a alcanzar un valor de equilibrio que depende del clima y de las características y uso del suelo. En este trabajo se analizan por métodos estadísticos las posibles relaciones entre el contenido de carbono orgánico total ( $C_t$ ) o de carbono extraíble con pirofosfato sódico ( $C_p$ ) y otras propiedades edáficas, en suelos desarrollados sobre rocas básicas y en similares condiciones macroclimáticas.  $C_t$  está correlacionado con el hierro ligado a la materia orgánica ( $Fe_p$ );  $C_p$  se correlaciona con  $Fe_p$  y  $Al_p$ . La exclusión de algunas muestras con cierto grado de hidromorfía eleva la significación de las correlaciones con el aluminio. Aplicando un análisis de regresión múltiple STEP, estas variables se relacionan con  $C_t$  y  $C_p$  de acuerdo con las siguientes expresiones:  $C_t = 9.24 Fe_p + 1.24$  ( $R^2 = 0.42$ );  $C_p = 1.31 Al_p + 1.76 Fe_p + 0.14$  ( $R^2 = 0.78$ ). La interacción con el hierro y aluminio estabiliza la materia orgánica, cuya degradación se ve ralentizada. A su vez, la materia orgánica frena la evolución de los compuestos amorfos de Fe y Al hacia formas más cristalinas.

**Palabras clave:** Hierro, aluminio, materia orgánica, suelos de Galicia, España.

### Abstract

BARRAL, M.T., ARIAS, M. & DÍAZ-FIERROS, F. (1997). Influence of iron and aluminium on soil organic matter content. *Nova Acta Científica Compostelana (Biología)*, 7: 137-146

Soil organic matter content tends towards a steady-state level that is influenced by the climate, soil management and soil properties. In this work, the relationships between total organic carbon ( $C_t$ ) or pyrophosphate-extractable carbon ( $C_p$ ) and soil properties are examined by means of statistical methods.  $C_t$  was positively related with iron bound to organic matter ( $Fe_p$ ) while  $C_p$  was related with  $Fe_p$  and  $Al_p$ . Exclusion of wet soils increased the significance of the correlations between  $C_t$  or  $C_p$  and Al. Using step multiple regression analysis the following equations were obtained:  $C_t = 9.24 Fe_p + 1.24$  ( $R^2 = 0.42$ );  $C_p = 1.31 Al_p + 1.76 Fe_p + 0.14$  ( $R^2 = 0.78$ ). The interaction between organic matter and Fe or Al stabilizes organic components against decomposition and inhibits the transformation of amorphous Fe and Al compounds into crystalline minerals.

**Key words:** Iron, aluminium, organic matter, Galician soils, Spain.

## INTRODUCCIÓN

El contenido en materia orgánica (MO) del suelo está determinado por el clima, las características locales del sitio, vegetación y uso del suelo, y la interacción de la materia orgánica con otros componentes edáficos.

El clima tiene un papel de primer orden en la evolución de la materia orgánica del suelo, a través de la disponibilidad de agua y de la temperatura, factores ambos esenciales para que haya una actividad microbiana que lleve a cabo la descomposición de los residuos orgánicos que se incorporan al suelo, su humificación y mineralización. Existe una opinión generalizada que atribuye a los suelos de zonas tropicales húmedas menores contenidos de materia orgánica que los suelos de zonas templadas, pues la elevada temperatura y pluviosidad aumentarían la velocidad de descomposición de la materia orgánica. Sin embargo, ALLISON (1973) y SÁNCHEZ (1976) encuentran que algunos suelos tropicales tienen más MO que lo que cabría esperar de su temperatura media anual.

Además del macroclima, el microclima y especialmente el edafoclima (régimen hídrico y térmico) influyen en el contenido de MO del suelo. Un buen ejemplo lo constituyen los suelos con horizontes hísticos, caracterizados por la acumulación de materia orgánica poco descompuesta, que se forman en condiciones de aireación restringida por efecto de la hidromorfía, y cuya génesis está favorecida por las bajas temperaturas.

El uso del suelo es otro factor importante, pues condiciona la cantidad y composición de la materia orgánica que se incorpora al suelo. Así, por ejemplo, el cultivo continuado hace disminuir la cantidad de MO del suelo, pues generalmente se devuelven al suelo menores cantidades de residuos, al mismo tiempo que, con el laboreo y encalado, se favorece la mineralización de la MO.

Bajo similares condiciones climáticas y uso del suelo, el contenido en MO del suelo se ha relacionado con la textura y con diversos constituyentes inorgánicos del suelo. SÁNCHEZ (1976)

observó que la velocidad de descomposición de la MO disminuye cuando aumenta el contenido de arcilla, óxidos y alófana. ALLISON (1973) señaló que la adsorción de la MO sobre otras partículas de arcilla -principalmente filosilicatos 2:1- y la formación de complejos organometálicos con Fe, Al o Ca son factores importantes que determinan la evolución y contenidos de MO del suelo. WADA (1995) llegó a una conclusión semejante, afirmando que la interacción del humus con Fe y Al tiene una importancia capital en los contenidos de MO de andosoles y de suelos fuertemente alterados, bajo clima tropical y templado.

Los horizontes superficiales de los suelos de Galicia suelen tener 3-20 % de MO, alcanzando en ocasiones valores cercanos al 40 %. Estos contenidos son elevados en comparación con los de otros suelos de la Península y pueden, en principio, atribuirse a una pluviosidad elevada y temperaturas moderadas o bajas. Sin embargo, la acumulación de MO es incluso más elevada de lo que predicen los parámetros climáticos (Fig. 1), lo que se ha atribuido a la interacción de la MO con determinados componentes minerales, que lentifican su mineralización. Los valores más altos de MO en horizontes minerales se han relacionado con la presencia de formas activas de Al en suelos con carácter ándico, podsoles y ránkeres atlánticos (CARBALLAS *et al.*, 1978; PUGA, 1982; GARCÍA-RODEJA *et al.*, 1987).

El objetivo de este trabajo es investigar las posibles relaciones entre los contenidos de materia orgánica y otros constituyentes y parámetros edáficos, en un conjunto de suelos de Galicia desarrollados sobre materiales geológicos fácilmente alterables, bajo condiciones macroclimáticas similares.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Se tomaron muestras superficiales (0-20 cm) de 33 suelos de la provincia de La Coruña, desarrollados sobre anfíbolitas (15 muestras), esquistos biotíticos (12 muestras) y gabros (6 muestras). Por sus características climáticas se

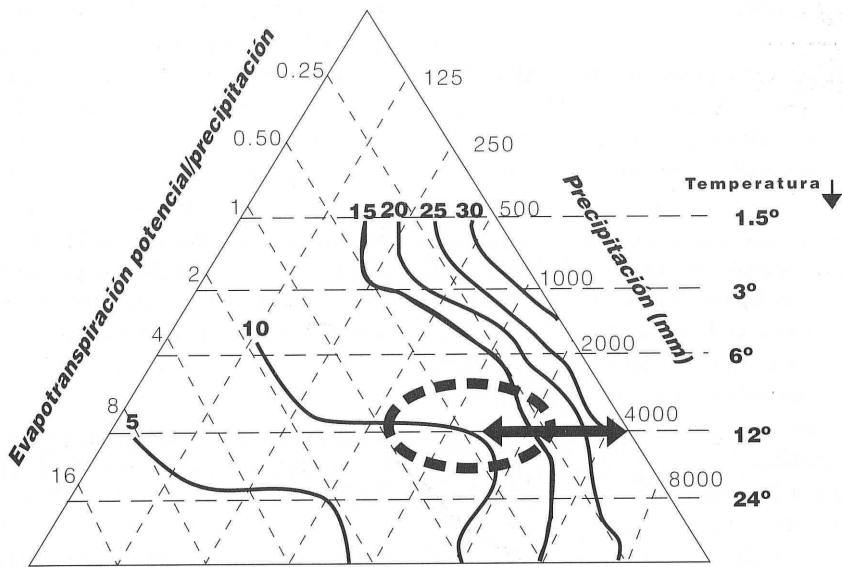


Fig. 1. Contenido en carbono (en  $\text{Kg m}^{-2}$ ) de los suelos del mundo (isolíneas) en relación con la precipitación, evapotranspiración potencial y temperatura (según ZINKE *et al.*, 1984). La zona enmarcada por una línea discontinua corresponde a las condiciones climáticas de Galicia. La flecha define los contenidos en carbono orgánico de los suelos gallegos.

encuadran en el tipo Csb de la clasificación de Köppen. Los suelos estaban mayoritariamente dedicados a prado o cultivo de maíz, dentro de un sistema de rotación mixto; diez de las muestras correspondían a prados permanentes, generalmente en posiciones topográficas más deprimidas y con cierto grado de hidromorfía.

Granulometría, pH, carbono y nitrógeno se determinaron según se describe en GUITIÁN & CARBALLAS (1976). El pH en NaF se determinó según FIELDS & PERROTT (1966). Se efectuaron extracciones selectivas de Fe con pirofosfato de sodio 0.1 N a pH 10 ( $\text{Fe}_p$ ) (BASCOMB, 1968), ácido oxálico-oxalato amónico a pH 3 durante 4 h en oscuridad ( $\text{Fe}_o$ ) (MCKEAGUE & DAY, 1966) y ditionito-citrato durante 16 h ( $\text{Fe}_d$ ) (HOLMGREN, 1967). En los extractos de oxálico se determinó también Si ( $\text{Si}_o$ ) y Al ( $\text{Al}_o$ ). En los extractos de pirofosfato se determinó también Al ( $\text{Al}_p$ ) y carbono ( $\text{C}_p$ ). Se efectuó además una extracción de Al ( $\text{Al}_s$ ) con NaOH 0.5 N durante 16 h (BORGGAARD, 1985).

## RESULTADOS

Los suelos presentan texturas francolimosas o francas. El pH en agua varía entre 4.7 y 6.2, el pH en KCl, entre 4.0 y 5.2; el incremento de pH ( $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) - \text{pH}(\text{KCl})$ ) oscila entre 0.1 y 1.1, reflejando un predominio -en ocasiones sólo ligero- de las cargas eléctricas negativas. El test de NaF da respuestas positivas ( $\text{pH} > 9.4$ ) o fuertemente positivas ( $\text{pH} > 11$ ) en los suelos bien drenados sobre anfibolitas y gabros; sin embargo, son frecuentes las respuestas negativas en los suelos de esquisto y en los prados húmedos sobre cualquier material.

El contenido de carbono orgánico total ( $\text{C}_t$ ) varía entre 2.5 y 15.9 % y el de N entre 0.22 y 1.11 % (Tabla I), con relaciones C/N entre 6.4 y 23.6, si bien la mayor parte de los valores se encuentran dentro del intervalo 12-18, característico de los suelos con humus de tipo moder. La fracción de C extraíble con pirofosfato ( $\text{C}_p$ ), que se considera asociada a hierro y aluminio, repre-

TABLA I. Resumen de los datos más relevantes de los suelos (en % peso/peso)

	C <sub>t</sub>	N	C/N	C <sub>p</sub>	Fe <sub>d</sub>	Fe <sub>o</sub>	Fe <sub>p</sub>	Al <sub>s</sub>	Al <sub>o</sub>	Al <sub>p</sub>	Si <sub>o</sub>
Máx.	15.95	1.25	24	4.12	6.46	2.41	1.29	2.31	1.69	1.56	0.31
Min.	2.46	0.20	6	0.72	1.60	0.50	0.21	0.32	0.27	0.20	0.01
Media	7.26	0.52	14	2.04	2.99	1.19	0.65	1.01	0.82	0.57	0.10

C<sub>t</sub>=carbono total. N=nitrógeno total. C/N=relación carbono/nitrógeno. C<sub>p</sub>=carbono soluble en pirofosfato. Fe<sub>d</sub>=hierro soluble en ditionito-citrato. Fe<sub>o</sub>, Al<sub>o</sub> y Si<sub>o</sub>=hierro, aluminio y silicio solubles en oxálico-oxalato. Fe<sub>p</sub> y Al<sub>p</sub>=hierro y aluminio solubles en pirofosfato. Al<sub>s</sub>= aluminio soluble en NaOH (%).

senta entre 16 y 85 % de C<sub>p</sub>, con un valor medio de 31 %. La diferencia entre C<sub>t</sub> y C<sub>p</sub> es mayor en los prados húmedos, en los que también se observan abundantes restos vegetales sin descomponer.

Los contenidos de hierro extraíble con ditionito (Fe<sub>d</sub>), que corresponden en términos generales al hierro no incluido en la red de silicatos, oscilan entre 1.60 y 6.46 %, que son valores de medios a altos dentro del conjunto de suelos de Galicia. El hierro extraíble con oxálico (Fe<sub>o</sub>), que incluye los compuestos amorfos, tanto orgánicos como inorgánicos, varía entre 0.50 y 2.41 %. La relación Fe<sub>o</sub>/Fe<sub>d</sub>, que es indicativa del grado de cristalinidad de los óxidos de Fe (es baja si predominan los óxidos cristalinos y se aproxima a 1 cuando dominan los compuestos amorfos), presenta en estos suelos una gran variabilidad, con valores comprendidos entre 0.1 y > 1, correspondiendo los valores más altos a los suelos hidromorfos. Coincidiendo con lo indicado por SCHWERTMANN (1988), se observa una correlación positiva ( $r = 0.58$ ,  $p < 0.01$ ) entre el contenido de carbono orgánico y la relación Fe<sub>o</sub>/Fe<sub>d</sub>. La relación Fe<sub>p</sub>/Fe<sub>o</sub>, que nos informa de la abundancia relativa de formas orgánicas (extraíbles con pirofosfato) dentro de los compuestos de Fe amorfo del suelo (Fe<sub>o</sub>), presenta valores comprendidos entre 0.3 y 1, con un valor medio de 0.57.

En el caso del aluminio, los extractantes mostraron en general un orden de eficacia decreciente Al<sub>s</sub> > Al<sub>o</sub> > Al<sub>p</sub>, aunque las diferencias fueron menos acusadas que en el caso del Fe. El

hidróxido sódico es el extractante más energético, pues solubiliza todas las formas de Al del suelo, excepto gran parte del que se encuentra formando parte de silicatos cristalinos. La relación Al<sub>o</sub>/Al<sub>s</sub> puede considerarse como un índice del grado de cristalinidad de los compuestos de Al, presentando en estos suelos poca variabilidad y un valor medio de 0.79, lo que indica un predominio de las formas de Al amorfo. Dentro de estos compuestos amorfos son más abundantes los ligados a la materia orgánica, pues la relación Al<sub>p</sub>/Al<sub>o</sub> presentó un valor medio de 0.68; este valor es superior al correspondiente para el Fe (0.57), indicando una mayor tendencia del Al a combinarse con la materia orgánica (OADES, 1989), aunque, probablemente debido a la menor abundancia de Al en estos suelos, se encuentra más hierro que aluminio ligado a la materia orgánica ( $C_p/Fe_p < C_p/Al_p$ ). La relación en peso  $C_p/Fe_p + Al_p$  presentó menor variabilidad que las relaciones individuales antes indicadas, oscilando entre 1.1 y 2.4.

Los valores de Si<sub>o</sub>, que pueden ser atribuidos únicamente a compuestos de tipo alófana, oscilaron entre 0.01 y 0.31 %; los valores más altos correspondieron a suelos sobre gabros o anfibolitas, que presentaban también valores elevados de Al<sub>o</sub> y respuestas positivas al test de NaF.

La Tabla II muestra las correlaciones simples entre las distintas variables estudiadas. El carbono total (C<sub>t</sub>) está relacionado con el N y también con el carbono extraíble en pirofosfato (C<sub>p</sub>), pues todos estos parámetros reflejan propiedades de

TABLA II. Matriz de correlaciones entre las distintas variables estudiadas

	C <sub>i</sub>	C <sub>p</sub>	N	Ar	L	A	Fe <sub>d</sub>	Fe <sub>o</sub>	Fe <sub>p</sub>	Al <sub>s</sub>	Al <sub>o</sub>	Al <sub>p</sub>	Si <sub>o</sub>	pH(H <sub>2</sub> O)	pH(KCl)	pH(NaF)
C <sub>i</sub>	1,00	0,69 <sup>***</sup>	0,80 <sup>***</sup>	-0,27	0,24	0,03	-0,22	0,57 <sup>***</sup>	0,66 <sup>***</sup>	0,25	0,18	0,21	0,29	-0,14	-0,01	-0,04
C <sub>p</sub>		1,00	0,68 <sup>***</sup>	-0,12	0,21	-0,20	0,14	0,59 <sup>***</sup>	0,70 <sup>***</sup>	0,45 <sup>*</sup>	0,59 <sup>***</sup>	0,71 <sup>***</sup>	0,56 <sup>***</sup>	-0,06	0,13	0,27
N			1,00	-0,25	-0,23	0,01	-0,26	0,66 <sup>***</sup>	0,66 <sup>***</sup>	0,14	0,16	0,27	0,29	-0,11	0,04	-0,25
Ar				1,00	-0,88 <sup>***</sup>	-0,18	0,06	-0,18	-0,27	0,12	-0,00	-0,07	-0,13	0,20	0,21	0,14
L					1,00	-0,29	-0,04	0,17	0,27	0,12	0,09	0,17	0,21	-0,12	-0,15	-0,05
A						1,00	-0,04	0,00	-0,02	-0,01	-0,20	-0,23	-0,18	-0,16	-0,13	-0,19
Fe <sub>d</sub>							1,00	-0,10	-0,23	0,49 <sup>*</sup>	0,43 <sup>*</sup>	0,37	0,21	0,32	0,33	0,43 <sup>*</sup>
Fe <sub>o</sub>								1,00	0,88 <sup>***</sup>	-0,08	0,01	0,04	0,03	0,13	0,16	-0,33
Fe <sub>p</sub>									1,00	0,10	0,15	0,24	0,21	-0,10	0,00	-0,12
Al <sub>s</sub>										1,00	0,88 <sup>***</sup>	0,81 <sup>***</sup>	0,89 <sup>***</sup>	0,05	0,34	0,75 <sup>***</sup>
Al <sub>o</sub>											1,00	0,91 <sup>***</sup>	0,90 <sup>***</sup>	0,23	0,48 <sup>**</sup>	0,85 <sup>***</sup>
Al <sub>p</sub>												1,00	0,85 <sup>***</sup>	0,26	0,75 <sup>***</sup>	0,75 <sup>***</sup>
Si <sub>o</sub>													1,00	0,43 <sup>*</sup>	0,70 <sup>***</sup>	0,70 <sup>***</sup>
pH(H <sub>2</sub> O)														1,00	0,87 <sup>***</sup>	0,17
pH(KCl)															1,00	0,36
pH(FNa)																1,00

\* p &lt; 0,01 \*\* p &lt; 0,001

Ar= arena. L= limo. A= arcilla),

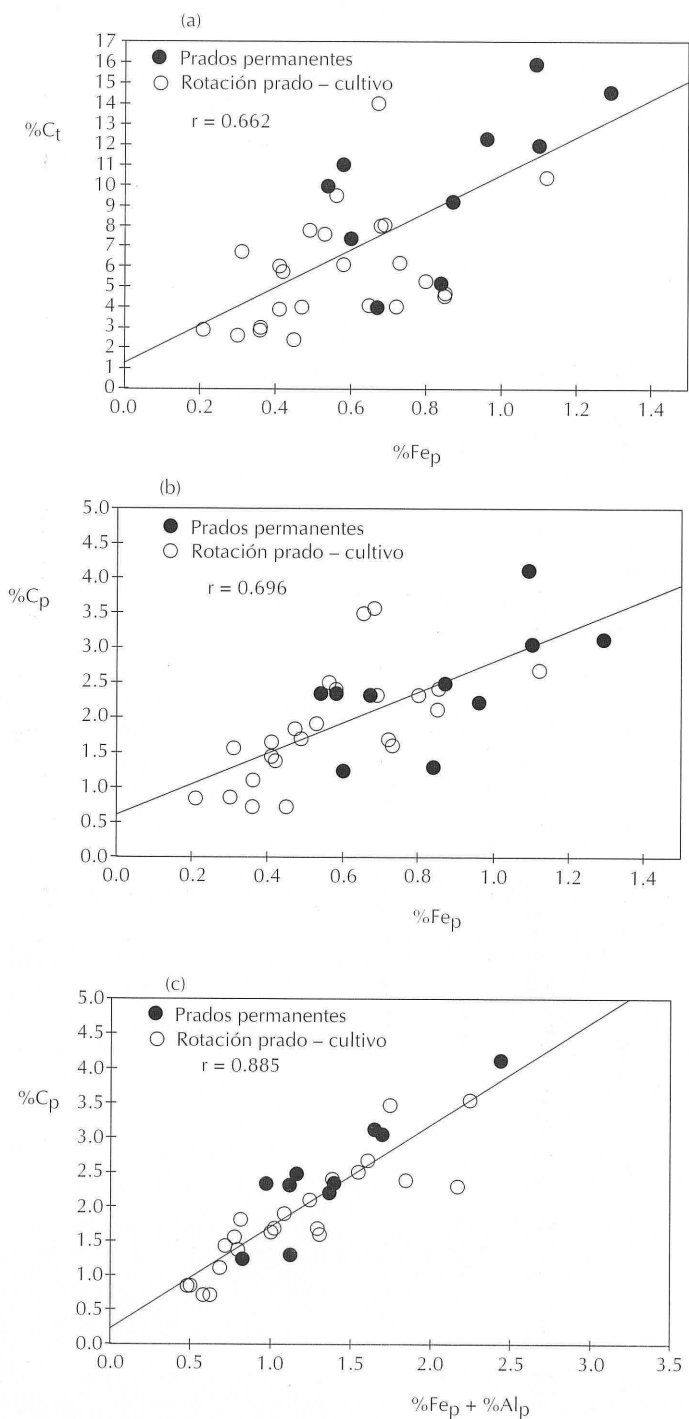


Fig. 2. Relaciones entre el carbono total (C<sub>t</sub>) y hierro extraíble en pirofosfato (Fe<sub>p</sub>) (a), entre carbono soluble en pirofosfato (C<sub>p</sub>) y Fe<sub>p</sub> (b), y entre C<sub>p</sub> y suma de Fe<sub>p</sub> y Al<sub>p</sub> (c).

la materia orgánica del suelo. Además,  $C_t$  presenta correlación positiva significativa con el hierro extraíble en oxálico ( $Fe_o$ ) y aún más elevada con el hierro extraíble en pirofosfato ( $Fe_p$ ). En la Fig. 2a se muestra la relación entre  $C_t$  y  $Fe_p$ ; aunque los suelos de prados húmedos presentan valores elevados de  $C_t$ , también tienen altas concentraciones de  $Fe_p$ , de modo que no se apartan de la tendencia general. En contraste con otros autores (SÁNCHEZ, 1976; WADA, 1995), no se han observado relaciones positivas entre el carbono orgánico y el contenido en arcilla.

El carbono extraído en pirofosfato ( $C_p$ ) se correlaciona con  $Fe_o$  y  $Fe_p$  (Fig. 2b), pero también con todas las formas de Al y con el Si soluble en oxálico (Tabla II); este hecho parece indicar que el pirofosfato ha extraído materia orgánica asociada con diversas formas de Fe y Al libres, en las que se incluirían fundamentalmente complejos organo-metálicos, pero también óxidos u (oxi)hidróxidos y aluminosilicatos amorfos de pequeño tamaño de partícula, sobre cuyas superficies se puede adsorber la materia orgánica, haciéndolos peptizables por el pirofosfato. Aunque no se ha incluido en la matriz, es de destacar la elevada correlación entre  $C_p$  y la suma de hierro y aluminio extraíbles en pirofosfato ( $Fe_p + Al_p$ ), en donde no se aprecian diferencias en el comportamiento de los prados hidromorfos en comparación con las otras muestras (Fig. 2c).

En la matriz de correlaciones se observa también que el pH en NaF presenta elevadas relaciones positivas con todas las formas de Al y con  $Si_o$ , pero también con  $Fe_d$ , que no se suele considerar un componente reactivo al NaF; probablemente ésta no es una relación causal sino que se debe a que  $Fe_d$  está a su vez relacionado con  $Al_s$  y  $Al_o$ .

Todas las formas de Al presentan elevadas correlaciones entre sí, pues, como vimos anteriormente, no hay grandes diferencias en las extracciones selectivas, reflejando un predominio de formas de baja cristalinidad, en gran parte asociadas a materia orgánica.  $Si_o$  se correlaciona con todas las formas de Al, lo cual nos lleva a pensar que este silicio puede formar parte de

compuestos aluminosilicatados de tipo alófana, pero también puede estar adsorbido sobre superficies de hidróxidos de Al; a su vez, ambos tipos de minerales pueden estar asociados con la materia orgánica.

Una vez que se ha observado que existen relaciones significativas entre el carbono y el hierro y aluminio solubles en diversos extractantes, se ha relacionado  $C_t$  con una serie de variables que representan compartimentos de Fe y Al:

$Fe_c$ : hierro cristalino ( $Fe_d - Fe_o$ )

$Fe_{ai}$ : hierro amorfo inorgánico ( $Fe_o - Fe_p$ )

$Fe_p$ : hierro ligado a la materia orgánica ( $Fe_p$ )

$Al_c$ : aluminio cristalino ( $Al_s - Al_o$ )

$Al_{ai}$ : aluminio amorfo inorgánico ( $Al_o - Al_p$ )

$Al_p$ : aluminio ligado a la materia orgánica ( $Al_p$ )

La matriz de correlaciones se expone en la Tabla III, donde se observa que el carbono orgánico total ( $C_t$ ) presenta una relación positiva significativa con la fracción de hierro asociada a la materia orgánica ( $Fe_p$ ), pero negativa con el hierro cristalino ( $Fe_c$ ).  $C_p$  presenta relaciones positivas significativas con  $Fe_p$  y  $Al_p$ . Las otras correlaciones significativas en la matriz corresponden a  $Fe_p$  y  $Fe_c$ , con signo negativo, y a  $Fe_p$  y  $Fe_{ai}$  (hierro amorfo inorgánico), con signo positivo.

Una vez conocidas las correlaciones simples significativas entre constituyentes y propiedades del suelo, se llevó a cabo un análisis de regresión múltiple (método Step), considerando como variable dependiente  $C_t$  (o  $C_p$ ) y como predictores los compartimentos de Fe y Al descritos con anterioridad. Los valores negativos se consideraron como cero.

Cuando se consideró  $C_t$  como variable independiente, únicamente  $Fe_p$  entró a formar parte de la ecuación de regresión, que adoptó la siguiente expresión:

$$C_t = 9.24Fe_p + 1.24 \quad (R^2 = 0.42)$$

Cuando se consideró  $C_p$  como variable independiente, la ecuación tomó la forma:

$$C_p = 1.31 Al_p + 1.76 Fe_p + 0.14 \quad (R^2 = 0.78)$$

TABLA III. Matriz de correlaciones entre contenidos de carbono total ( $C_t$ ) y carbono soluble en pirofosfato ( $C_p$ ), y los distintos compartimentos de hierro y aluminio

	$C_t$	$C_p$	$Fe_c$	$Fe_{ai}$	$Fe_p$	$Al_c$	$Al_{ai}$	$Al_p$
$C_t$	1,00	0,69 <sup>oo</sup>	-0,43 <sup>o</sup>	0,38	0,66 <sup>oo</sup>	0,17	-0,15	0,21
$C_p$		1,00	-0,12	0,38	0,70 <sup>oo</sup>	0,09	-0,02	0,71 <sup>oo</sup>
$Fe_c$			1,00	-0,28	-0,53 <sup>oo</sup>	0,35	0,24	0,27
$Fe_{ai}$				1,00	0,60 <sup>oo</sup>	-0,34	0,01	-0,15
$Fe_p$					1,00	-0,07	-0,12	0,24
$Al_c$						1,00	0,04	0,36
$Al_{ai}$							1,00	0,14
$Al_p$								1,00

<sup>o</sup>  $p < 0.01$       <sup>oo</sup>  $p < 0.001$

( $Fe_c = Fe_d - Fe_o$ ) = hierro cristalino. ( $Fe_{ai} = Fe_o - Fe_p$ ) = hierro amorfo inorgánico. ( $Al_c = Al_n - Al_o$ ) = aluminio cristalino. ( $Al_{ai} = Al_o - Al_p$ ) = aluminio amorfo inorgánico.  $Fe_p$  y  $Al_p$  = hierro y aluminio ligados a la materia orgánica.

Al excluir los prados húmedos, aumenta la significación de las correlaciones entre  $C_t$  y  $Al$ , y disminuyen para el Fe. Las ecuaciones obtenidas en el análisis de regresión toman la forma:

$$C_t = 3.16Al_p + 3.65 \quad (R^2 = 0.25)$$

$$C_p = 1.76 Al_p + 1.01Fe_{ai} + 0.33 \quad (R^2 = 0.77)$$

$Fe_{ai}$  y  $Al_p$  explican, como en el caso anterior, un porcentaje elevado de la varianza de  $C_p$ , pero  $Al_p$  explica sólo un 25% de la varianza de  $C_t$ , por lo que en este subconjunto de suelos bien drenados, otros factores del suelo o del sitio deben de influir significativamente en la acumulación del carbono orgánico, tales como la vegetación actual, el manejo del suelo, el estado de agregación o la actividad biológica.

## DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados expuestos, hierro y aluminio parecen tener un papel fundamental en la acumulación de la materia orgánica en los suelos estudiados. Los mecanismos por

los que estos metales influyen en la dinámica y evolución de la materia orgánica son múltiples:

a) Formando complejos organo-metálicos, que se hacen insolubles al aumentar su carga metálica (DUCHAUFOR, 1976; SCHNITZER & KHAN, 1972).

b) Favoreciendo la formación de complejos arcillo-húmicos, al actuar como nexo de unión entre los minerales de la arcilla y las moléculas orgánicas (MORTLAND, 1970; THENG & SCHARPENSEEL (1975).

c) Como óxidos sobre cuyas superficies puede adsorberse directamente la materia orgánica (SCHWERTMANN *et al.*, 1986).

d) Catalizando las transformaciones de oxidación y polimerización de la materia orgánica, que conducen a la formación de compuestos húmicos más estables (HUANG, 1995).

e) Favoreciendo la agregación del suelo, lo que tiene como consecuencia que la materia orgánica ocluida en el interior de los agregados de alta densidad queda protegida frente al ataque de los microorganismos (ELLIOT, 1986; VAN VEEN & KUIKMAN, 1990).

f) En el caso del aluminio, ejerciendo efectos tóxicos sobre los microorganismos, con lo que se frena la degradación de los compuestos orgánicos (ALEXANDER, 1980).

g) Combinaciones de Al y Si en compuestos de tipo alófana de bajo grado de orden pueden asociarse a la materia orgánica, ralentizando su degradación (WADA & INOUE, 1967; BOUDOT *et al.*, 1986). Este efecto protector ha sido observado también en complejos organo-alumínicos y en asociaciones de hidróxidos de Al no cristalinos con materia orgánica (BOUDOT, 1992).

El resultado general de estas interacciones es una estabilización de la materia orgánica, lo que favorece su acumulación. A su vez, la adsorción de la materia orgánica sobre compuestos de bajo grado de orden tiene un efecto estabilizador que ralentiza o inhibe su transformación en minerales de mayor cristalinidad (HUANG & VIOLANTE, 1986; SCHWERTMANN, 1988).

Estas interacciones organo-minerales son responsables, por otra parte, de algunas de las propiedades más características de los suelos gallegos desarrollados sobre materiales fácilmente alterables. En suelos jóvenes -o en horizontes rejuvenecidos- sobre materiales muy alterables (gabros, anfíbolitas), la materia orgánica se une rápidamente a los productos de la alteración, formando principalmente complejos organo-alumínicos o asociándose con aluminosilicatos de baja cristalinidad; como consecuencia de estas asociaciones, los suelos pueden presentar propiedades ándicas (elevada reactividad al NaF, baja densidad aparente, elevada retención de fosfatos, altos contenidos de Al y Si solubles en ácido oxálico, etc.) (MACÍAS *et al.*, 1978; GARCÍA-RODEJA *et al.*, 1987). En los horizontes en los que la alteración actual no es tan rápida e intensa, por contener menos minerales alterables o porque el medio es menos agresivo, son las formas más o menos hidroxiladas del hierro y aluminio las que actúan como elementos insolubilizadores de la materia orgánica, actuando también como nexo de unión entre ésta y los silicatos de la arcilla, formándose un complejo arcillo-húmico de gran estabilidad, que permite el desarrollo de una estructura característica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, M. (1980). Effects of acidity on microorganisms and microbial processes in soils. *In: Hutchinson, T. & Haves, M. (Eds.), Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems: 363-364.* Plenum Publishing Corporation, New York.
- ALLISON, F.E. (1973). *Soil organic matter and its role in crop production.* Elsevier, Amsterdam.
- BASCOMB, C.L. (1968). Distribution of pyrophosphate extractable iron and organic carbon in soils of various groups. *J. Soil Sci.*, **19**: 251-268.
- BORGGGAARD, O.K. (1985). Organic matter and silicon in relation to the crystallinity of soil iron oxides. *Acta Agric. Scand.*, **35**: 398-406.
- BOUDOT, J.P. (1992). Relative efficiency of complexed aluminum, noncrystalline Al hydroxide, allophane and imogolite in retarding the biodegradation of citric acid. *Geoderma*, **52**: 29-39.
- BOUDOT, J. P., BEL-HADJ, B. A. & CHONE, TH. (1986). Carbon mineralization in andosols and aluminum-rich highland soils. *Soil Biol. Biochem.*, **18**: 457-461.
- CARBALLAS, T., CARBALLAS, M. & JACQUIN, F. (1978). Biodegradation et humification de la matière organique des sols humifères atlantiques. *An. Edafol. Agrobiol.*, **37**: 205-212.
- DUCHAUFOUR, P. (1976). Dynamics of organic matter in soils of temperate regions: its action on pedogenesis. *Geoderma*, **15**: 31-40.
- ELLIOT, E.T. (1986). Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **50**: 627-633.
- FIELDER, M. & PERROTT, K.W. (1966). The nature of allophane in soils. III. Rapid field and laboratory test for allophane. *N.Z.J. Sci.*, **9**: 623-624.
- GARCÍA-RODEJA, E., SILVA, B.M. & MACÍAS, F. (1987). Andosols developed from non-volcanic materials in Galicia, NW Spain. *J. Soil Sci.*, **38**: 573-591.
- GUITIÁN, F. & CARBALLAS, T. (1976). *Técnicas de análisis de suelos.* Editorial Pico Sacro, Santiago de Compostela.
- HOLMGREN, G.G.S. (1967). A rapid citrate-dithionite extractable iron procedure. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **31**: 210-211.
- HUANG, P.M. (1995). The role of short-range ordered mineral colloids in abiotic transformations of organic components in the environment. *In: Huang, P.M., Berthelin, J., Bollag, J.M., McGill, W.B. & Page, A.L. (Eds.), Environmental impact of soil component interactions XI: 135-167.* Lewis Publishers, USA.

- HUANG, P.M. & VIOLANTE, A. (1986). Influence of organic acids on crystallization and surface properties of precipitation products of aluminum. *In: Huang, P.M. & Schnitzer, M. (Eds.), Interactions of soil minerals with natural organics and microbes VI: 159-221. SSSA Spec. Pub. no. 17, Madison, USA.*
- MACÍAS, F., PUGA, M. & GUTIÁN, F. (1978). Caracteres ándicos de suelos sobre gabros de Galicia (NO de España). *Anal. Edafol. Agrobiol.*, **37**: 187-203.
- McKEAGUE, J.A. & DAY, J.H. (1966). Dithionite- and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Can. J. Soil Sci.*, **46**: 13-22.
- MORTLAND, M.M. (1970). Clay-organic complexes and interactions. *Adv. Agron.*, **22**: 75-115.
- OADES, J.M. (1989). An introduction to organic matter in mineral soils. *In: Dixon, J.B. & Weed, S.B. (Eds.), Minerals in Soil Environments III: 135-159, SSSA, Madison, Wisconsin, USA.*
- PUGA, M. (1982). *Estudio de los suelos sobre gabros*. Tesis doctoral (inéd.). Universidad de Santiago.
- SÁNCHEZ, P.A. (1976). *Properties and management of soils in the tropics*. John Wiley & Sons, New York.
- SCHNITZER, M. & KHAN, S.U. (1972). *Humic substances in the environment*. Marcel Dekker, New York.
- SCHWERTMANN, U. (1988). Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvironments. *In: Stucki, J.W., Goodman, B.A. & Schwertmann, U. (Eds.), Iron in Soils and Clay Minerals XI: 267-308. NATO ASI Series, The Netherlands.*
- SCHWERTMANN, U., KODAMA, H. & FISCHER, W.R. (1986). Mutual interactions between organics and iron oxides. *In: Huang, P.M. & Schnitzer, M. (Eds.), Interactions of soil minerals with natural organics and microbes VII: 223-250. SSSA, Madison, USA.*
- THENG, B.K.G. & SCHARPENSEEL, H.W. (1975). The adsorption of <sup>14</sup>C-labelled humic acid by montmorillonite. *Proc. Intern. Clay Conf.:* 643-653, México City, México.
- VAN VEEN, J.A. & KUIKMAN, P.J. (1990). Soil structural aspects of decomposition of organic matter by microorganisms. *Biogeochemistry*, **11**: 213-233.
- WADA, K. (1995). Role of aluminum and iron accumulation of organic matter in soils with variable charge. *In: Huang, P.M., Berthelin, J., Bollag, J.M., McGill, W.B. & Page, A.L. (Eds.), Environmental Impact of Soil Component Interactions III: 47-58. CRC Press, USA.*
- WADA, K. & INOUE, K. (1967). Retention of humic substances derived from rotted clover leaves in soils containing montmorillonite and allophane. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **13**: 9-16.
- ZINKE, P.J., STRANGEBERGER, A.G., POST, W.M., EMANUEL, W.R. & OLSON, J.S. (1984). *Worldwide organic soil carbon and nitrogen data*. ORNL/TM-8857, Oak Ridge Nat. Laboratory, Tennessee.