XXII REUNIÓN NACIONAL DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE LA CIENCIA DEL SUELO

Dpto. de Edafología y Química Agrícola. Fac. de Biología.
Universidad de Santiago de Compostela

(Septiembre 2001)

XXII REUNIÓN NACIONAL DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE LA CIENCIA DEL SUELO

Dpto. de Edafología y Química Agrícola. Fac. de Biología.
Universidad de Santiago de Compostela

(Septiembre 2001)

XXII REUNION NACIONAL DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE LA CIENCIA DEL SUELO

Dpto. de Edafología y Química Agrícola. Fac. de Biología.
Universidad de Santiago de Compostela

(Septiembre 2001)

Organización: R. Calvo de Anta

Coordinación: R. Calvo y F.Macías

Secretaría: E. Luis

Determinaciones analíticas:
M.T. Martínez Iglesias
E. Buján García
C. Pérez Llaguno
J. Camino Castiñeiras
M.J. Santiso Rodríguez
E. Barreal Madroño
C. Bulnes Arévalo
R. López Sánchez
R. Bondenlle Blanco
R. Verde Vilanova
E. Romero Lema
E. Parga Ures

Apoyo informático:
E. Luis Calvo
E. Barreal Madroño
X. Lomba Martínez

Participan:
E. Alvarez Rodríguez
F. Arce Vázquez
E. Barreal Madroño
R. Calvo de Anta.
M. Camps Arbestain
M.L. Fernández Marcos
C. García Paz
E. Garciá-Rodeja
A. Gil Bueno
M.X. Gómez Rey
P. S. Kidd
E. López Mosquera
F. Macías Vazquez
A. Martinez Cortizas
A. Merino García
C. Monterroso Martínez
X.C. Novoa Muñoz
X.L. Otero Pérez
A. Pérez Alberti
X. Pontevedra Pombal
L. Rodríguez Lado
T. Taboada García

Depósito Legal: C-1576/01
Imprime: Grafisant, S.L.

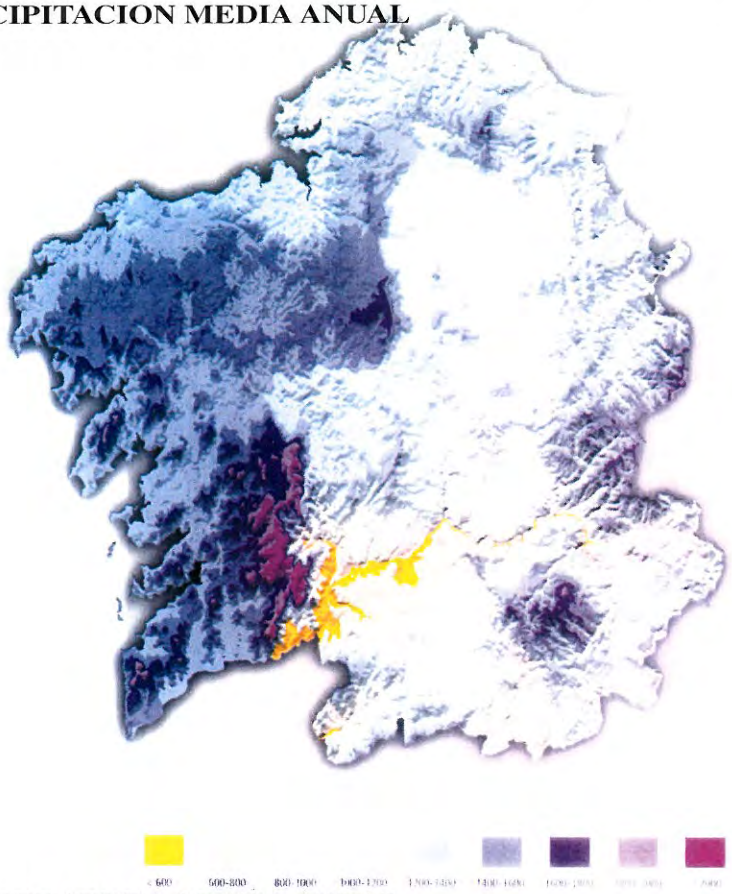
INDICE

GUIA DE ITINERARIOS
Factores de Formación de los suelos de Galicia 2
Itinerarios de Campo 10
Suelos sobre materiales graníticos: Perfil nº 1 (Alfóz) 14
Suelos sobre rocas cuarcíticas: Perfil nº 2 (Ferreira) 20
Perfil nº 3 (Montouto) 24
Suelos orgánicos: Perfil nº 4 (Montouto) 26
Perfil nº 5 (Eume-Montouto) 28
Suelos sobre rocas básicas: Perfil nº 6 (S.Clodio) 30
Perfil nº 7 (E. de Mera) 36
Perfil nº 8 (Capelada) 38
Suelos hidromorfos: Perfil nº 9 (Capelada) 40
Suelos sobre rocas ultrabásicas serpentinizadas: Perfil nº 10 (Capelada) 42
Suelos sobre sedimentos cuaternarios de marisma: Perfil nº 11 (Ortigueira) 48
Algunos ejemplos de suelos contaminados:
Mina Touro: Un ejemplo de minería de materiales con sulfuros 54
La Cuenca de As Pontes: Explotación de lignitos y recuperación de suelos de mina 68

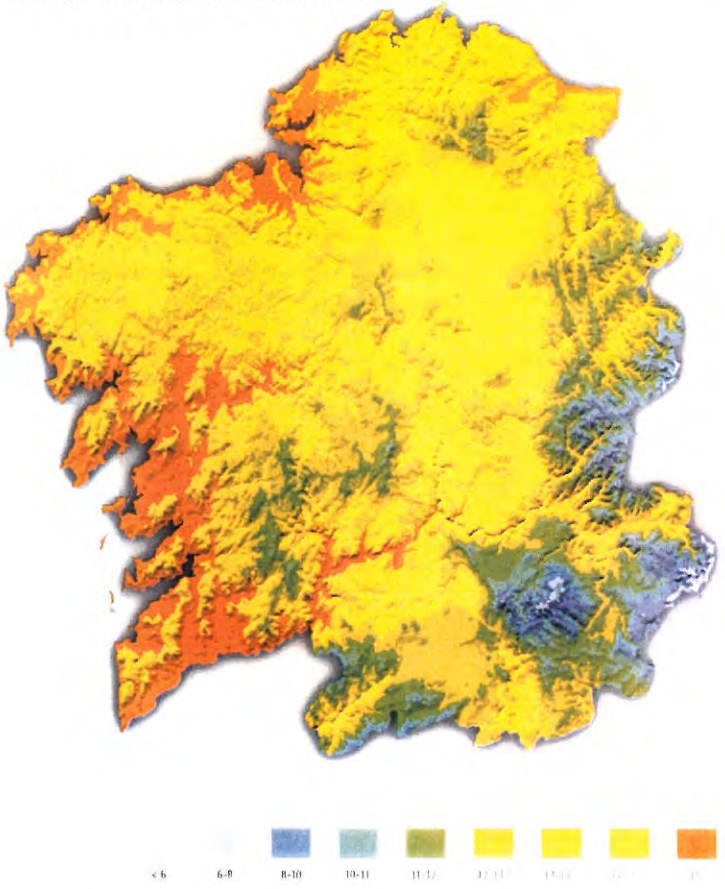
INFORMACION COMPLEMENTARIA
Distribución geográfica, cronología, factores y propiedades de las turberas de Galicia 80
Importancia del aluminio en el comportamiento geoquímico de los suelos de Galicia. Puesta en evidencia de un medio de transición entre el dominio templado y subtropical húmedo. 96
Capacidad agronómica de los suelos de Galicia 102
Efecto de la aplicación de caliza magnésica en diferentes granulometrías sobre algunas propiedades químicas del suelo 106
Efecto de los fertilizantes de liberación gradual en el crecimiento de plantaciones de eucalipto en Galicia 108
De Residuos a Recursos: soluciones ambiemtales y agronómicas a la aplicación de residuos ganaderos y agroindustriales 110
Influencia de los factores edáficos y del estado nutricional sobre la productividad de *P.radiata* en plantaciones de Galicia 111
Influencia de diferentes especies forestales sobre las propiedades del suelo en Galicia 112
Influencia de la tala forestal y del manejo de restos de corta sobre los flujos de gases de tipo invernadero en un suelo forestal 117
Los suelos como sumidero de carbono: Materia orgánica de los suelos de Galicia 118
Fitorremediación: una técnica novedosa para la descontaminación de suelos 122
Contaminación de suelos y aguas por nitratos 125
Suelos contaminados por isómeros de HCH en el polígono de Torneiros (Porriño, Pontevedra) 126
Adsorción de Fluor en suelos de Galicia desarrollados sobre diferentes materiales de partida 128
Cargas Críticas de Contaminantes Acidos 132
La adsorción de sulfatos en suelos de Galicia 136
Efectos de la deposición ácida sobre suelos y aguas superficiales de la cuenca alta del río Sor 140
Estudio integrado de sistemas forestales afectados por lluvias ácidas 150
Contaminación de suelos y aguas y caracterización de los materiales de escombrera de la siderúrgica de Teixeiro (A Coruña) 152
Bibliografía 154

FACTORES DE FORMACIÓN DE LOS SUELOS DE GALICIA

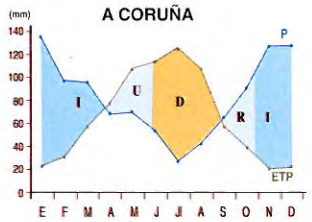
PRECIPITACION MEDIA ANUAL

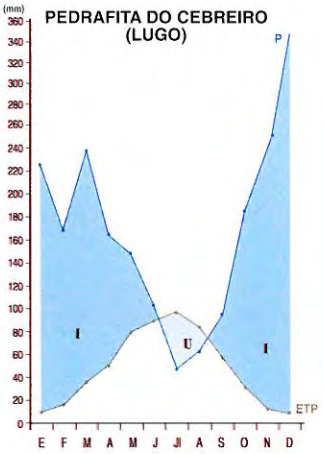


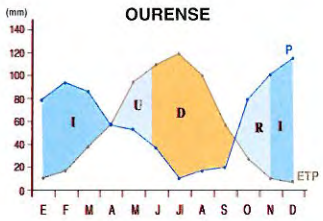
TEMPERATURA MEDIA ANUAL

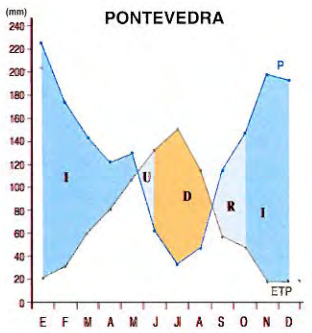


Precipitación y temperatura media anual *(Martínez Cortizas y Pérez Alberti, 1999)*



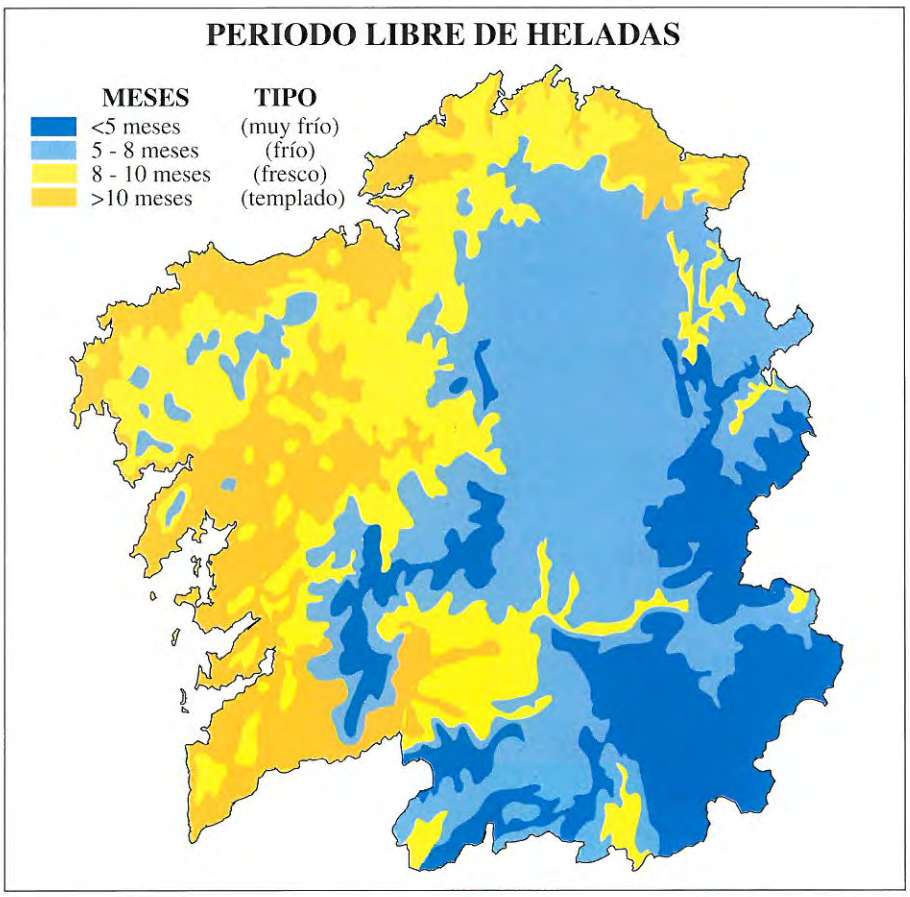


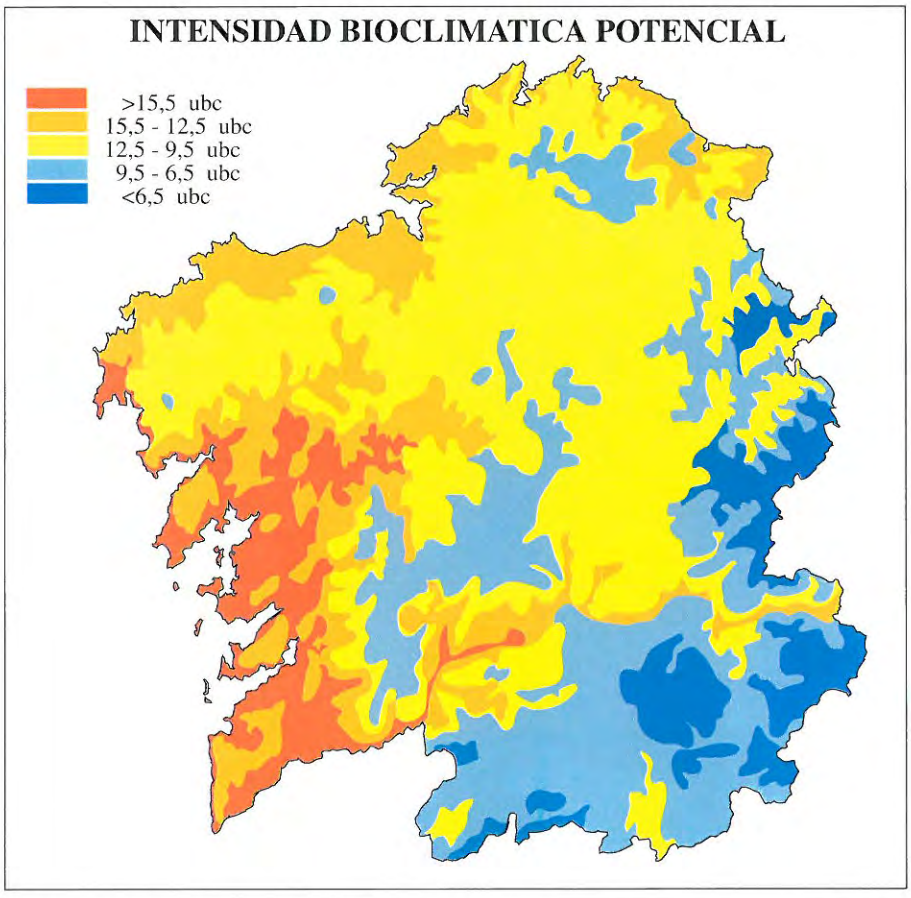




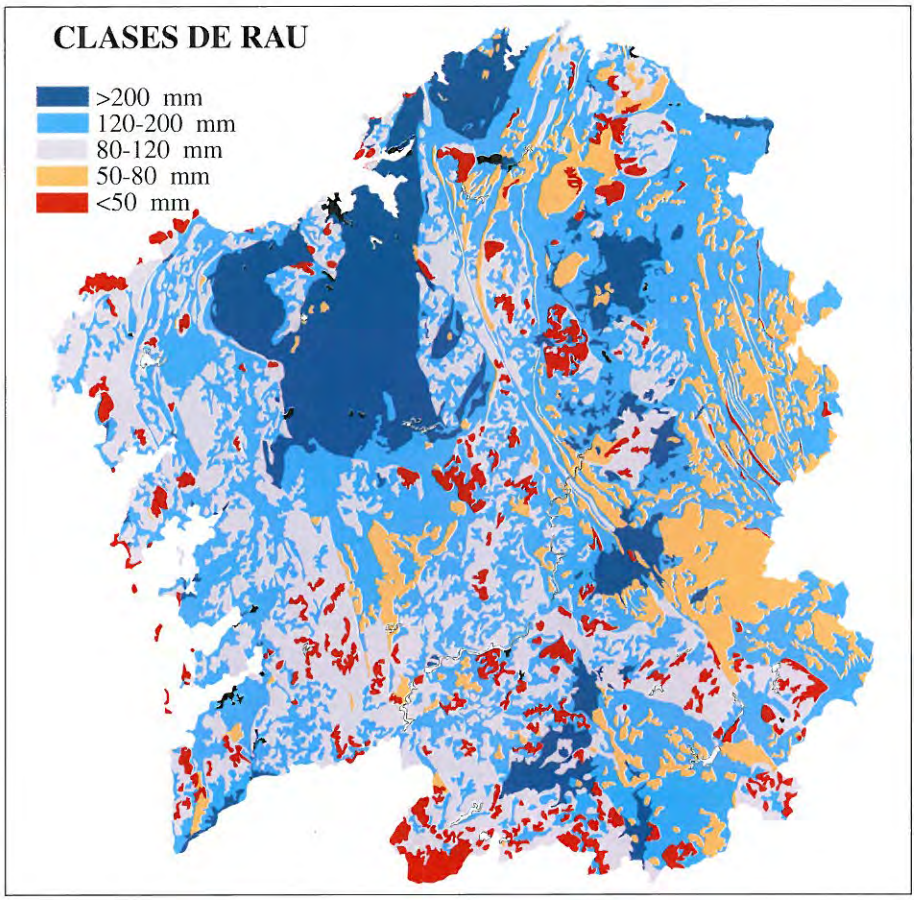
BALANCE HIDRICO DEL SUELO
(Reserva: 100mm)

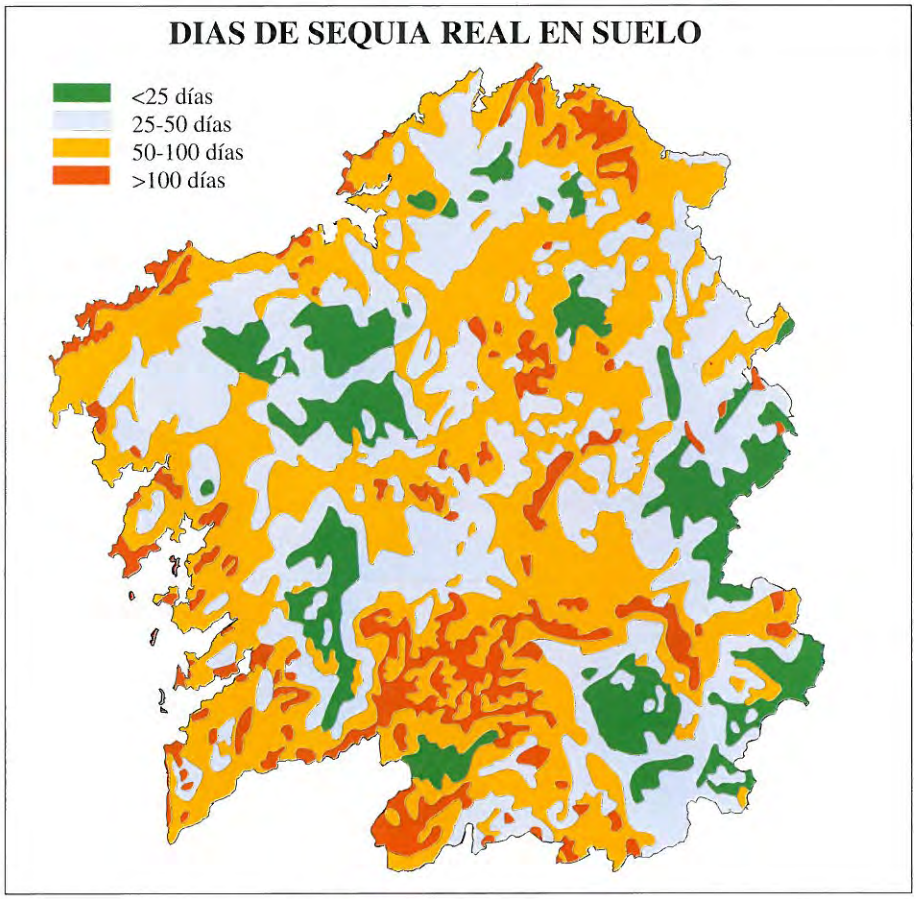
P: Precipitación (mm)
ETP: Evapotranspiración potencial (mm)
I: Período de infiltración
U: Utilización de la reserva
D: Déficit absoluto
R: Recarga





Periodo libre de heladas e Intensidad Bioclimática Potencial *(Carballeira et al., 1985)*

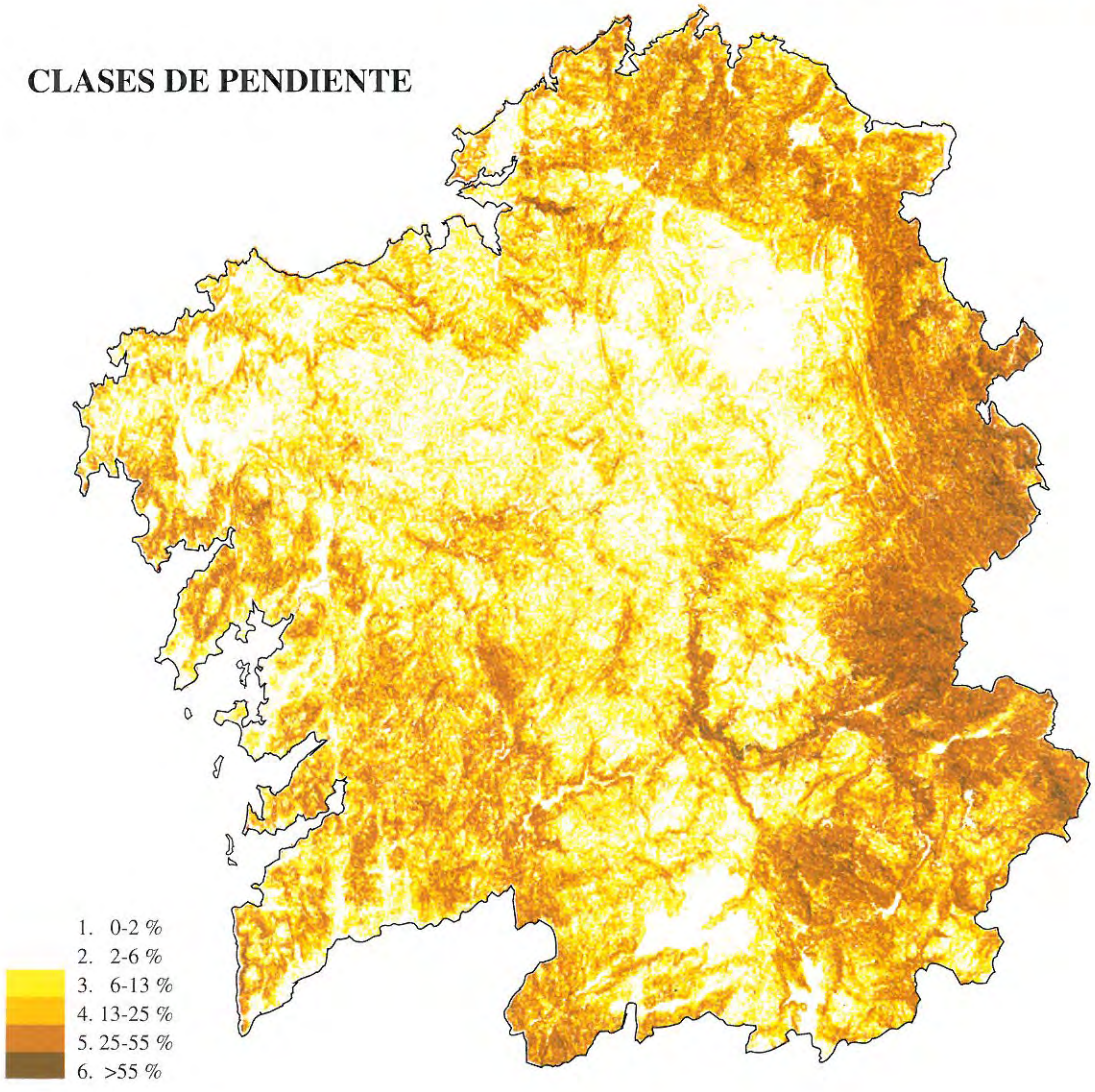


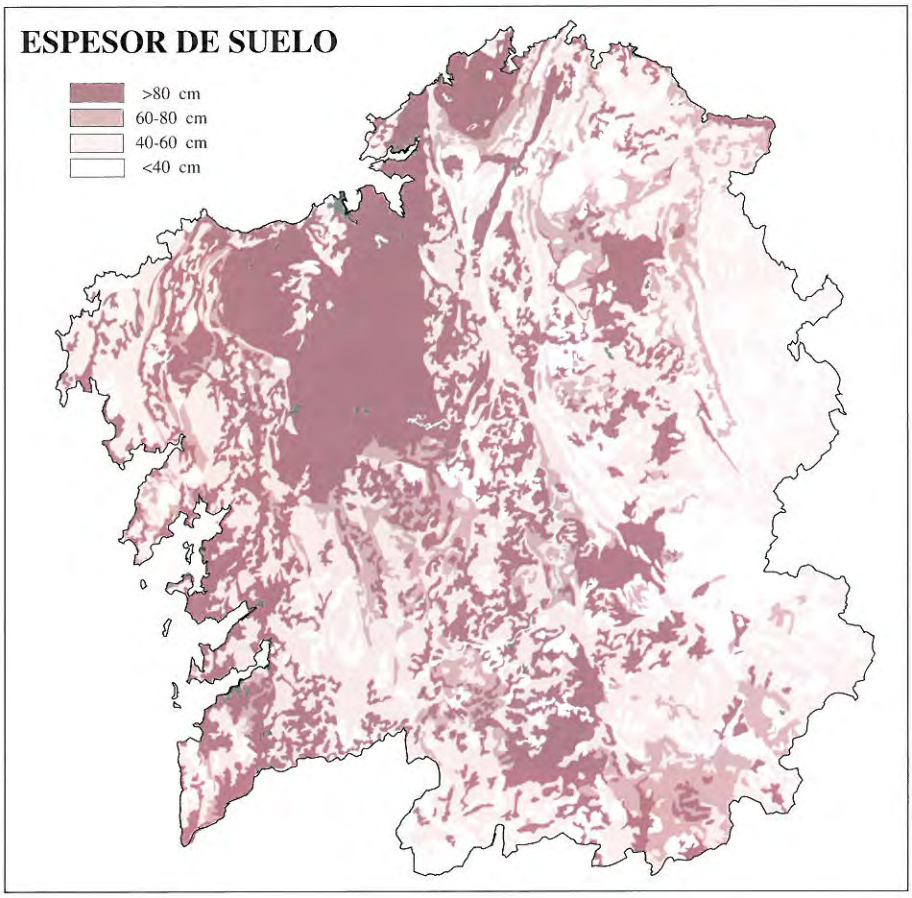


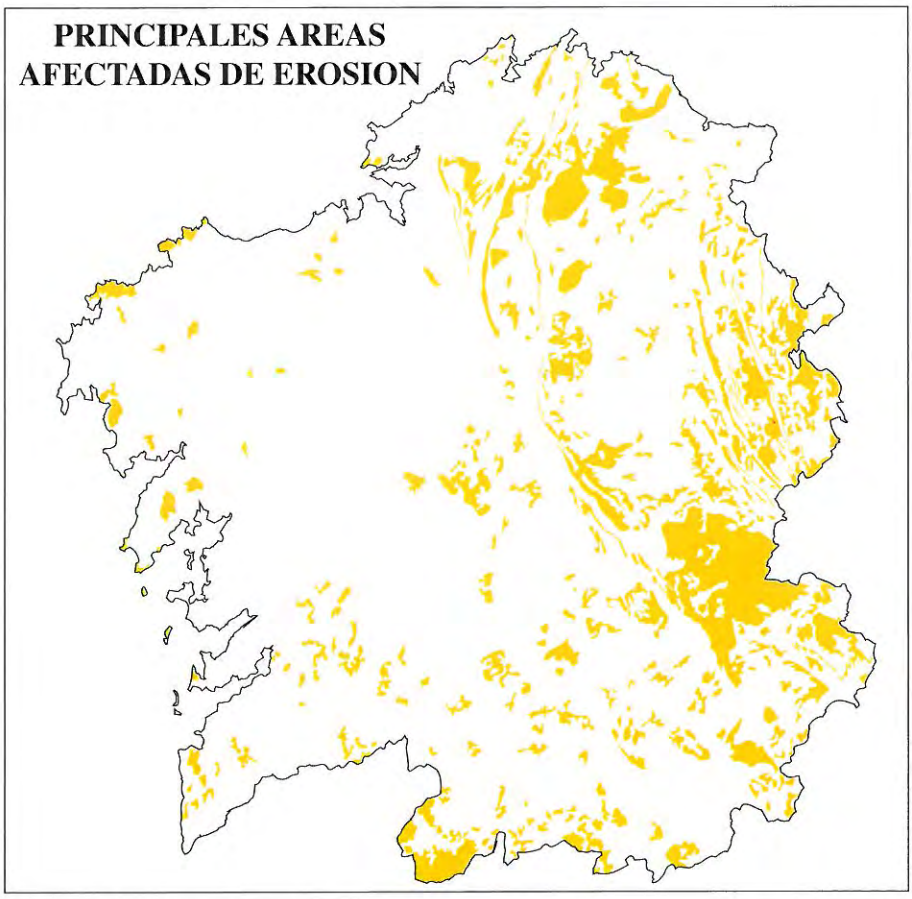
Reserva de Agua Util y estimación del déficit de humedad del suelo *(Macías y Calvo de Anta, 1999)*

MAPA HIPSOGRÁFICO

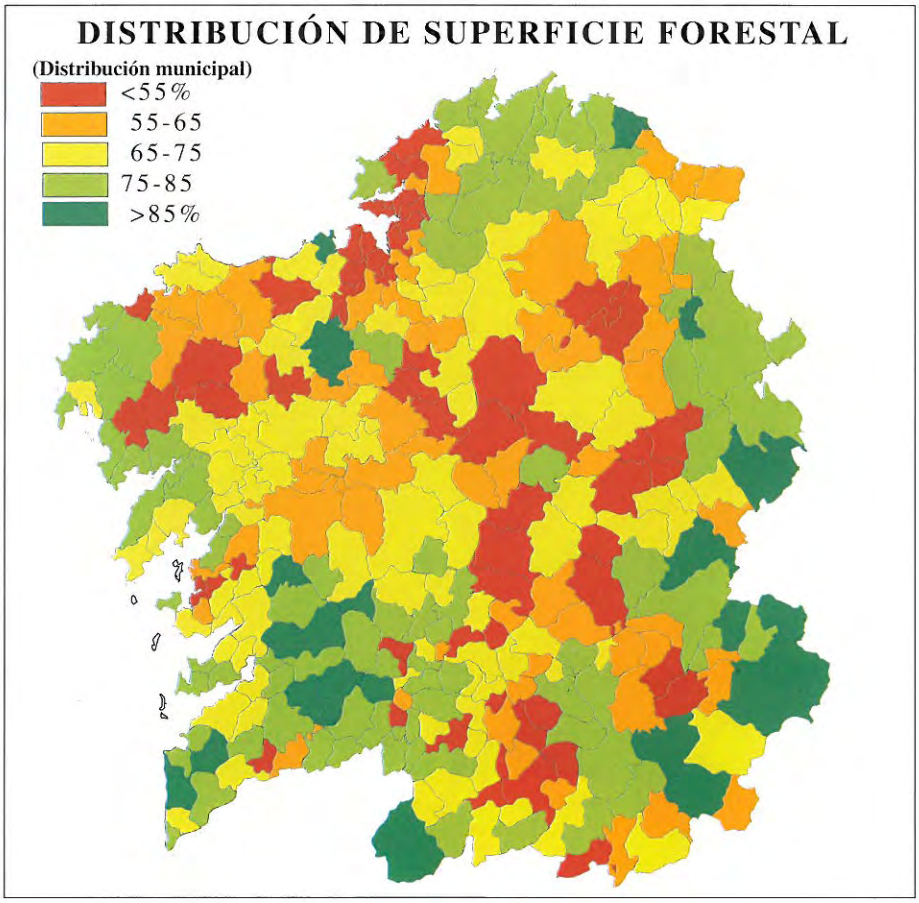
CLASES DE PENDIENTE

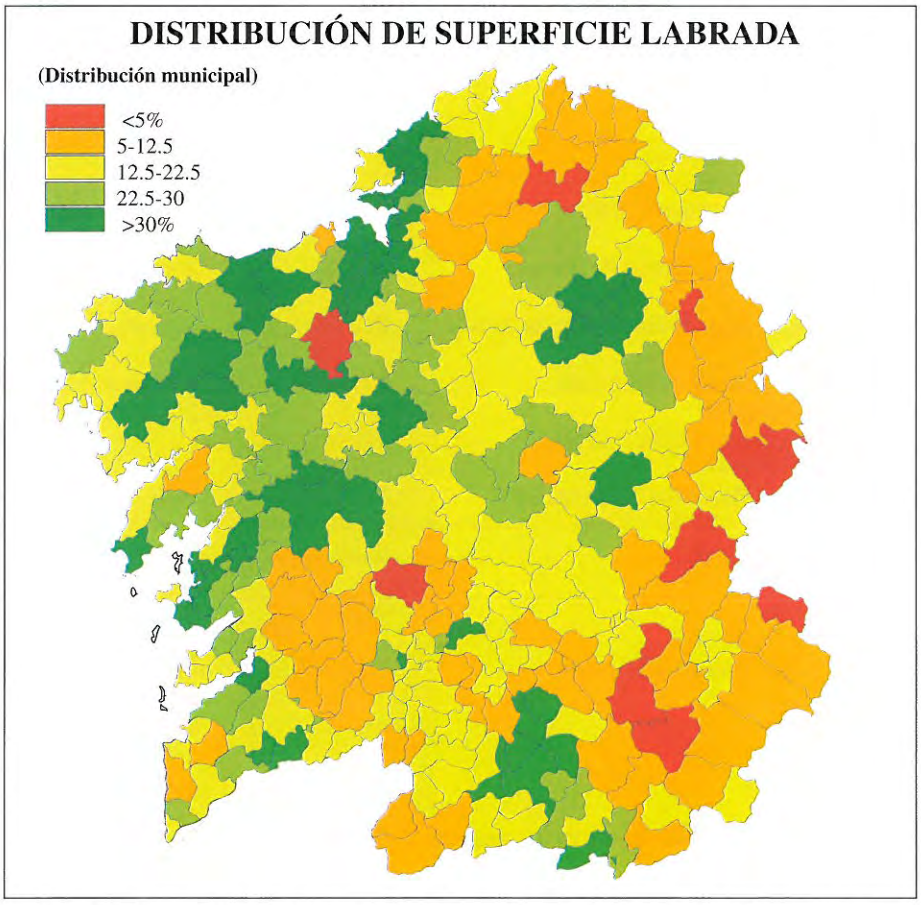




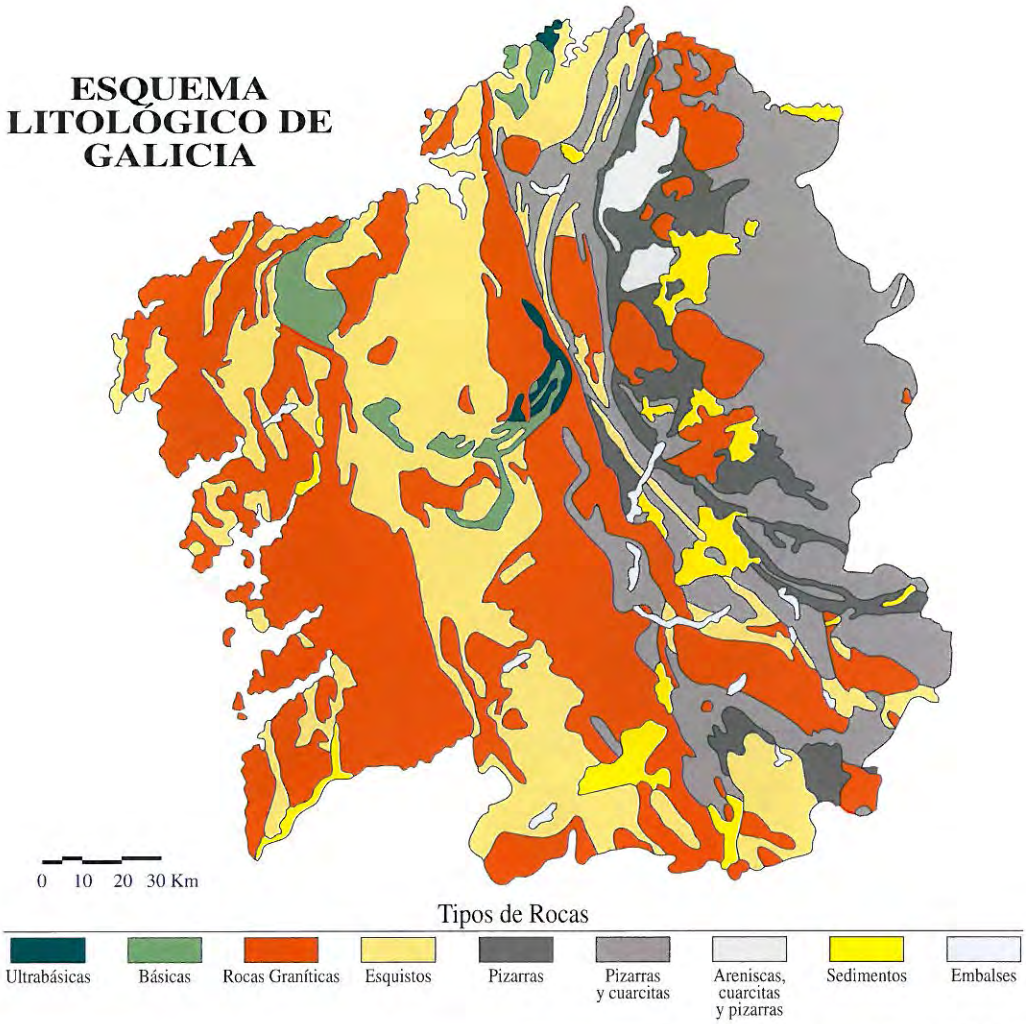


Espesor del suelo y principales áreas afectadas de erosión *(Calvo de Anta y Macías, 2000)*



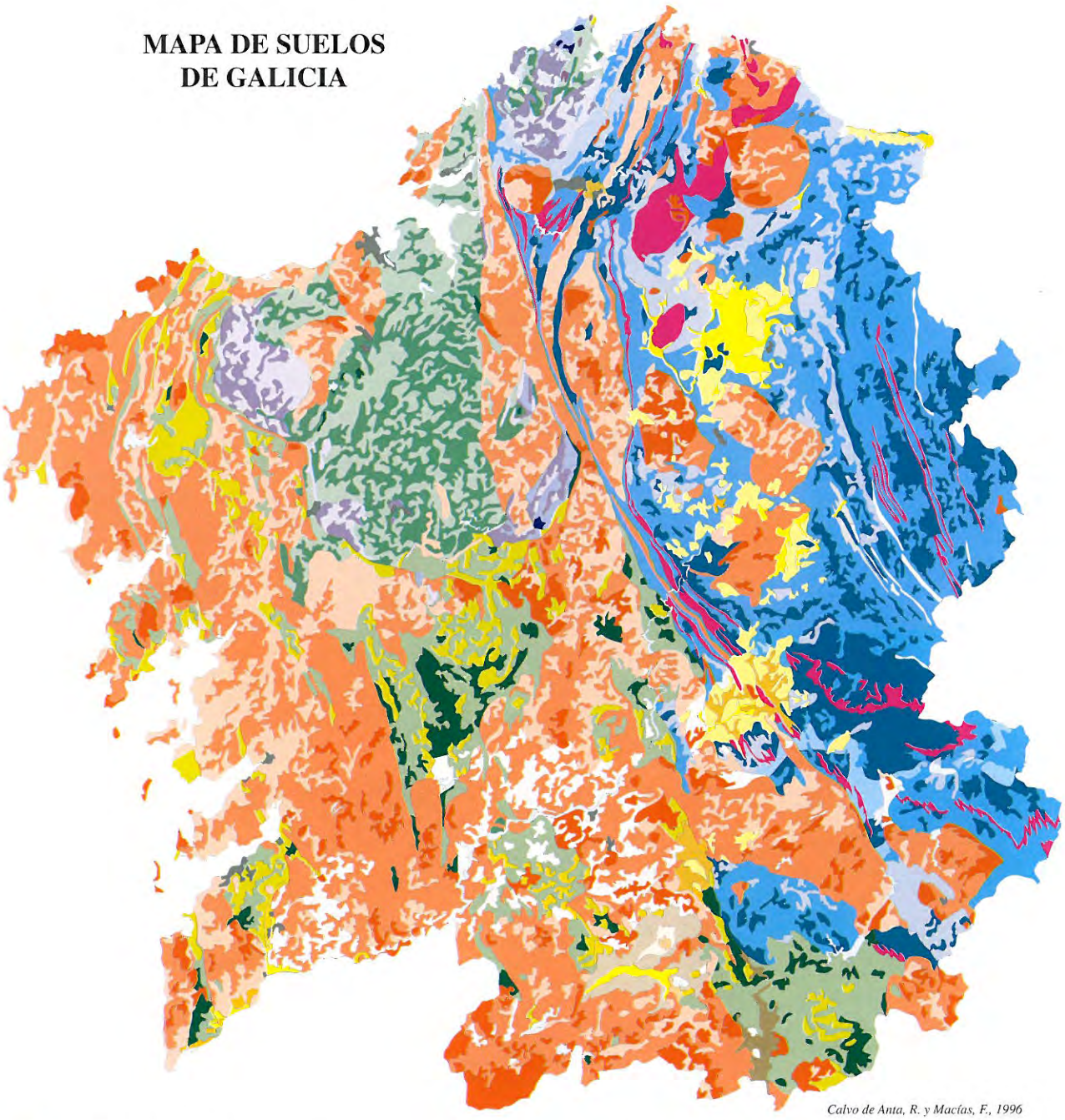


Distribución municipal de la superficie forestal y labrada de Galicia (F. Macías, elaborada a partir de datos oficiales de la Xunta de Galicia).



ROCA	MINERALES	ALTERABILIDAD	CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE IMPORTANCIA PARA LA EDAFOGÉNESIS
Serpentinitas	Crisotilo, Antigorita, Clorita, Anfíboles, Talco	Media-Baja	Alto cotenido de Mg Pobreza en K, P y Al
Gabros	Plagioclasas, Biotita, Piroxenos, Anfíboles	Muy Alta	Riqueza en Fe Pobreza en K
Anfibolitas	Plagioclasas, Anfíboles, Clorita, Biotita	Muy Alta	Riqueza en Fe
Granitos	Cuarzo, Micas, Feldespatos, Plagioclasas	Media	Alto contenido de Al y K
Esquistos Biotíticos	Feldespatos, Micas, Cuarzo, Plagioclasas	Alta-Muy Alta	
Cuarzoesquistos	Cuarzo, Moscovita, Feldespatos	Media-Baja	Bajo contenido de Ca y Mg
Pizarras	Cuarzo, Micas	Media-Baja	Pobreza en Ca y Mg
Cuarcitas	Cuarzo	Muy Baja	Muy alto nivel de Si Pobreza en Ca, Mg, Fe, Al
Areniscas	Cuarzo, Micas, Feldespatos	Baja-Muy Baja	Muy alto nivel de Si Pobreza en Ca, Mg, Al
Calcitas	Calcita	Muy Alta	Facilidad de disolución
Dolomitas	Dolomita	Muy Alta	Facilidad de disolución
Sedimentos continentales	Cuarzo, Caolinita, Micas, Feldespatos	Baja	Variedad de composición y propiedades
Sedimentos marinos	Cuarzo, Calcita, Micas, Sales solubles	Variable	Variedad de composición y propiedades

MAPA DE SUELOS DE GALICIA



Calvo de Anta, R. y Macías, F., 1996

SUELOS SOBRE ROCAS GRANITICAS
- Leptosoles alumi-úmbricos y Regosoles alumi-úmbricos (inclusiones de Leptosoles alumi-líticos).
- Regosoles alumi-úmbricos y Cambisoles alumi-húmicos.
- Cambisoles húmicos (inclusiones de Regosoles úmbricos).
- Cambisoles dístricos (inclusiones de Regosoles dístricos).

SUELOS SOBRE PIZARRAS Y FILITAS
- Regosoles alumi-úmbricos y Leptosoles alumi-úmbricos.
- Cambisoles alumi-húmicos y Regosoles alumi-úmbricos.
- Cambisoles húmicos.
- Regosoles alumi-dístricos y Leptosoles alumi-dístricos.
- Cambisoles dístricos.

SUELOS SOBRE R. BASICAS
- Leptosoles andi-úmbricos.
- Cambisoles andi-ferrálicos y Andosoles úmbricos.
- Cambisoles húmicos y Cambisoles ferrali-húmicos.

SUELOS SOBRE ESQUISTOS
- Regosoles alumi-úmbricos y Leptosoles alumi-úmbricos.
- Cambisoles alumi-húmicos.
- Cambisoles ferrali-alumi-húmicos.
- Cambisoles dístricos y Cambisoles húmicos.
- Cambisoles húmicos y Cambisoles ferrali-húmicos.
- Regosoles alumi-dístricos y Leptosoles alumi-dístricos.
- Cambisoles dístricos y Cambisoles alumi-dístricos.

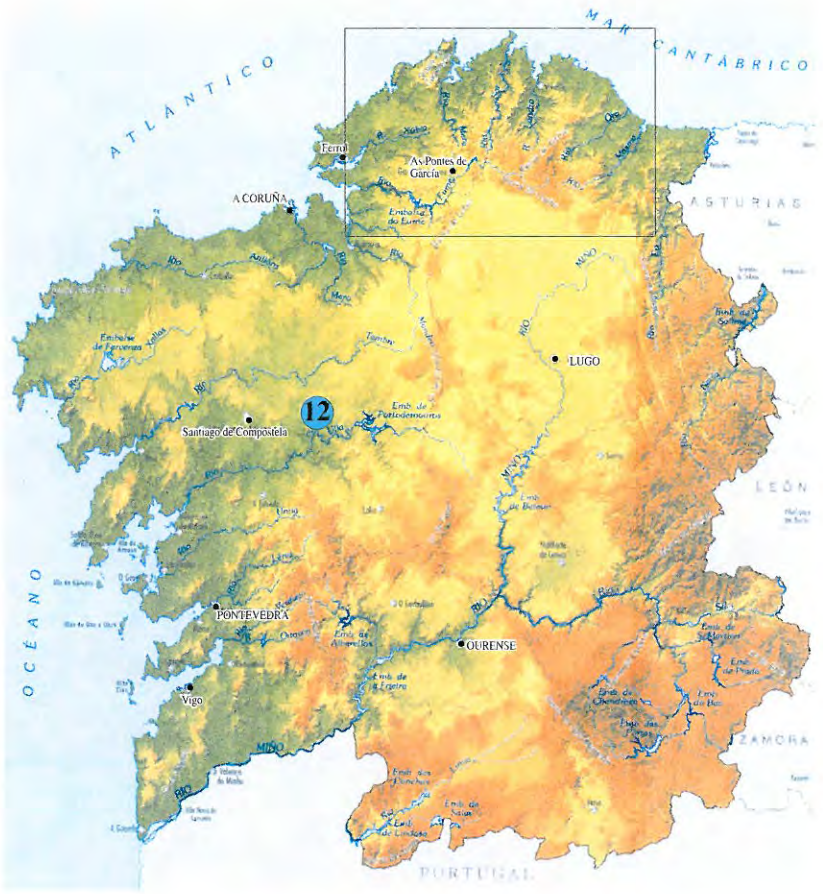
SUELOS SOBRE CALIZAS
- Leptosoles rudi-réndsicos y phaeozem rudi-calcáreos.
- Cambisoles húmicos y Cambisoles eutricos.

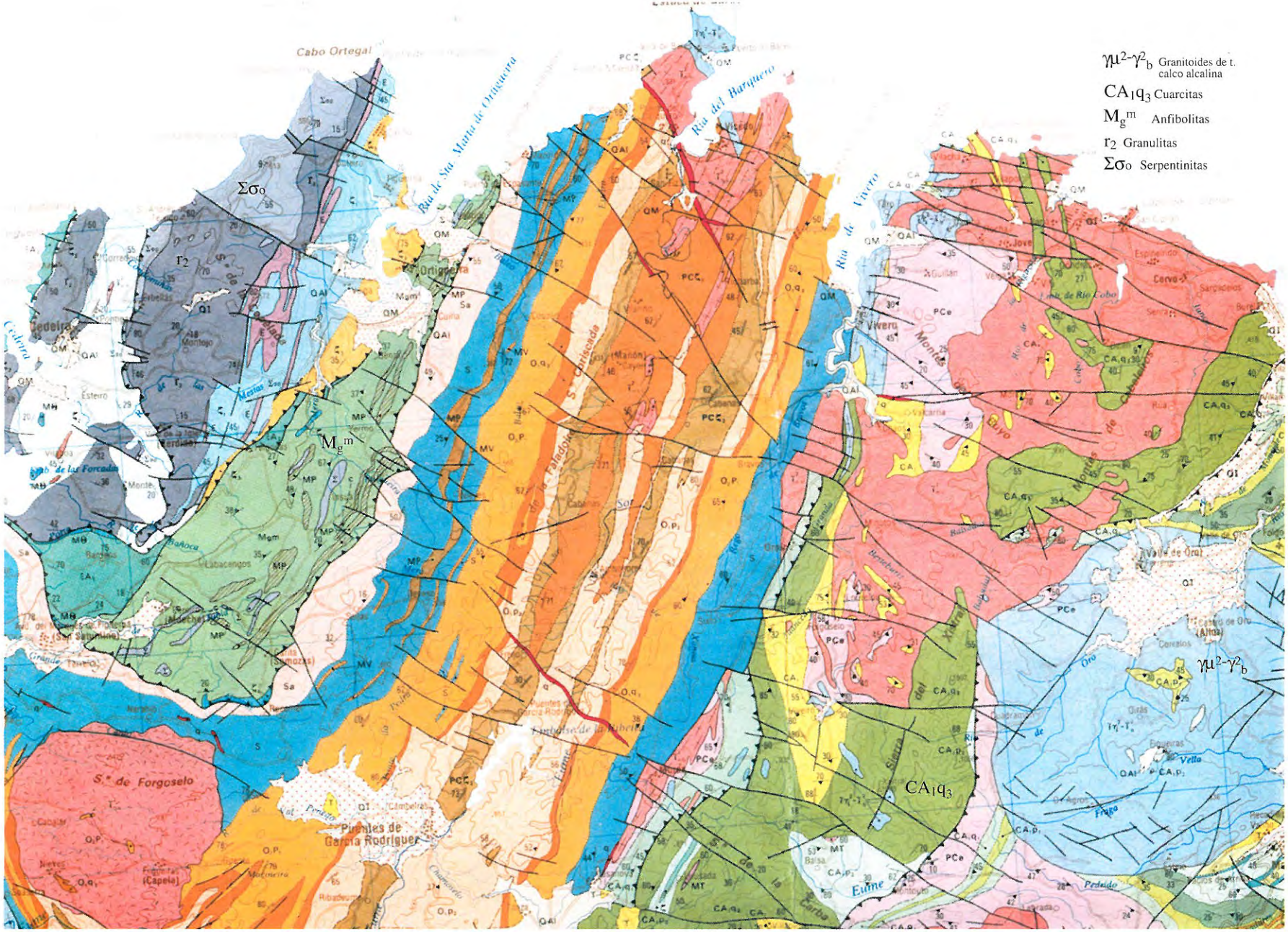
SUELOS SOBRE R. ULTRABASICAS
- Leptosoles rudi-móllicos (inclusiones de Phaeozem rudi-háplicos).
- Cambisoles rudi-crómicos y Phaeozem rudi-háplicos (inclusiones de Gleysoles úmbricos).

SUELOS SOBRE MATERIALES SEDIMENTARIOS
- Fluvisoles sálicos y tiónicos (inclusiones de Fluvisoles calcáreos).
- Fluvisoles úmbricos y dístricos (inclusiones de Gleysoles úmbricos).
- Arenosoles álbicos.
- Alisoles háplicos y Regosoles dístricos (inclusiones de Cambisoles dístricos)
- Cambisoles húmicos y gleicos (inclusiones de Podsol háplico).
- Alisoles háplicos y Regosoles úmbricos (inclusiones de Cambisol húmico).
- Cambisoles dístricos y Alisoles ferri-háplicos (inclusiones de Fluvisol dístrico y húmico).
- Fluvisoles gley-dístricos y Regosoles gley-dístricos (inclusiones de Gleysol húmico).
- Cambisoles gley-húmicos y Alisoles háplicos.
- Regosoles dístricos y Antrosoles áricos.
- Cambisoles dístricos y húmicos y Alisoles háplicos.

Dpto. EDAFOLOGIA
Fac. BIOLOGIA
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO

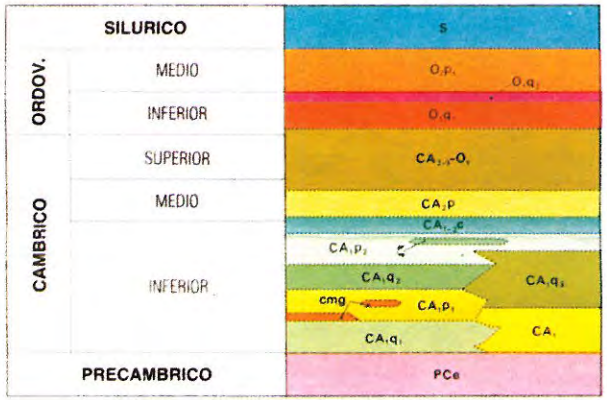
ITINERARIOS DE CAMPO




Cabo Ortegal
Ría de Sta. María de Ortigueira
Ría del Barquero
Ría de Viveiro
Cedeira
Ortigueira
Viveiro
Mondoñedo
Xuvia
Oro
Eume
Pedroso
Pedroso
Pedroso

QI Indiferenciado
QC Coluviones, derrubios de ladera
QAl Aluviones
QM Playas, dunas, marismas
QR Depósitos en relación con la rasa
T Arenas, arcillas, gravas, capas de lignito

DOMINIO DEL MANTO DE MONDOÑEDO



S Capas de la Garganta. Pizarras, ampelitas
O.P. Pizarras de Luarca. Pizarras negras
$O.q_2$ Capas superiores del Río Eo. Cuarcitas
$O.q_1$ Capas inferiores del Río Eo. Cuarcitas, areniscas,
CA_{2-1}-O. Capas de Villarnea. Pizarras negras, cuarcitas, ar
CA.P Capas de Riotorto. Pizarras, areniscas
CA.c Caliza de Vegadeo. Calizas, dolomías
ζ Niveles de gneises
$CA.p_2$ Capas de tránsito. Pizarras, niveles carbonatado
$CA.q_3$ Cuarcita de Gistral. Cuarcitas, microconglomerat
$CA.q_2$ Cuarcitas de Cándana superior. Cuarcitas, arenis
cmg Calizas, dolomías.
$CA.p_1$ Pizarras de Cándana. Pizarras, areniscas
CA. Capas de Cándana inferior. Cuarcitas, esquistos
$CA.q_1$ Cuarcitas de Cándana inferior. Cuarcitas, pizarra
PCe Serie de Villalba. Tramo inferior. Pizarras, arenis gneises anfibólicos

DOMINIO DEL «OLLO DE SAPO»

Sa Areniscas, esquistos, metavulcanitas, cuarcitas,
MV Metavulcanitas ácidas
MP Metariolitas
S Pizarras, ampelitas, esquistos púrpura, areniscas
O.P. Pizarras de Luarca. Pizarras negras
$O.q_1$ Cuarcita Armoricana. Cuarcitas
$O.p_1$ Pizarras de los Montes. Pizarras, areniscas, cuar
$PC\zeta_2$ Ollo de Sapo de Grano Fino. Gneises microglan cuarcitas feldespáticas, esquistos
$PC\zeta_1$ Ollo de Sapo de Grano Grueso. Gneises glandul megacristales de feldespato.

(IGME, 1984)

COMPLEJO CABO ORTEGAL

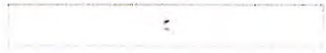
UNIDAD DE MOECHE

ξA_2 Anfibolitas de Purrido

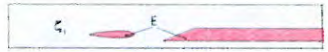
ζ_4 Gneises
c Calizas
Σ Serpentinitas
MP Metaqueratofidos
Mgm Grupo Moeche

UNIDADES DE CEDEIRA Y LA CAPELADA

ζ_3 Gneises de Carino



ζ Gneises de Estaporia

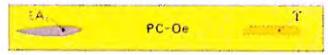


E Eclogitas
ζ Gneises bandeados

T Metabasitas en facies granulítica y anfibolítica
Formaciones de Bacariza y Candelaria

Σ_{so} Rocas ultrabásicas serpentinizadas

COMPLEJO DE ORDENES



T Cuarcitas
EA Esquistos con lentejones de anfibolitas y anfi
PC-Oe Esquistos de Ordenes. Esquistos, metagrauw

ROCAS IGNEAS

$\gamma\gamma_1^2$-i Granitoides de tendencia calcoalcalina
a) poco o nada deformados
b) con deformación apreciable
c) con deformación intensa

γ Granitoides de tendencia alcalina
a) granitos de dos micas con megacris
b) granitos de dos micas
b1) poco o
b2) con def
b3) con def

MΓ Metabasitas indiferenciadas
MΘ Metagabros
Me Metaperidotitas
Γ Ortoanfibolitas

SUELOS SOBRE MATERIALES GRANÍTICOS

Perfil nº 1 (Granitos de Alfoz)

INFORMACION ACERCA DEL SITIO DE LA MUESTRA

Ubicación: Municipio de Alfoz (Lugo). E 628610; N4817982 (Hoja 9 MTN)
Altitud: 240 m
Posición fisiográfica: Ladera
Forma del terreno circundandante: Colinado. Pendientes máximas 16-30%
Pendiente: Clase 4
Uso del suelo: Forestal arbolado
Régimen de humedad: údico
Régimen de temperatura: mésico
Fecha de observación: 5 de abril, 2001

INFORMACION ACERCA DEL SUELO

Material original:	Granitoides de tendencia calcoalcalina
Drenaje:	Clase 4. Bien drenado
Condiciones de humedad del suelo:	Capacidad de campo
Pedregosidad:	Clase 1. Moderadamente pedregoso
Afloramientos rocosos:	Clase 1. Moderadamente rocoso
Evidencias de erosión:	Inexistententes
Influencia humana:	Repoblación forestal, talas.

Horizontes	**Prof. (cm)**	**Descripción**
Ah	0-22	Horizonte mineral rico en materia orgánica; gris muy oscuro 10YR3/1 (h) y pardo grisaceo oscuro 10YR4/2 (s); franco-arenoso; estructura migajosa fina; no adherente, no plástico, friable (h) y blando (s); porosidad muy abundante y de distintos tamaños con predominio de los bioporos; moderadamente pedregoso con mayor abundancia en el límite del horizonte; raices finas y gruesas muy abundantes; limite neto e irregular.
Bw	22-68	Horizonte mineral, pardo amarillento 10YR5/6 (h) y pardo amarillento claro 10YR6/4 (s); franco-arcillo-arenoso; estructura migajosa; no adherente, no plástico, friable (h); abundantes raices, muy poroso; límite neto irregular.
C1	68-90	Horizonte mineral, amarillo parduzco 10YR6/6 (h) y pardo muy pálido 10YR8/3 (s); franco-arenoso; estructura de arena granítica; no plástico, no adherente, poros de pequeño tamaño y fisuras horizontales, escasas raices gruesas; límite gradual.
C2	>90	Horizonte mineral, pardo muy pálido 10YR7/4 (h) y 10YR8/3 (s), franco-arenoso, con predominio de la estrucura de saprolita; muy escasas raices gruesas; límite neto irregular con la roca dura.

DATOS ANALÍTICOS

	pH_{H2O} (1:2.5)	pH_{KCl}	pH_{NaF} (2')	pH_{abras}	%C	%MO	%N	C/N	P_{Olsen} mg/kg	Retención Fosfatos %	Indice Melánico	DOEO
Ah	4.86	4.23	7.90	4.82	7.11	12.26	0.38	18.7	6.0	67	1.78	0.34
Bw	4.59	4.17	9.35	5.15	0.87	1.50	<0.05	-	nd	-	-	-
C1	5.34	4.18	8.98	5.78	0.19	0.33	<0.05	-	nd	-	-	-
C2	5.40	4.06	8.71	6.06	0.08	0.14	<0.05	-	nd	-	-	-
Roca a.	-	-	-	6.88	-	-	-	-	nd			

Perfil nº 1(Granitos de Alfoz)

Análisis granulométrico

	%AG 2-0.2mm	%AF 0.2-0.05	%LG 0.05-0.02	%LF 0.02-0.002	$\%Ac_T$ <0.002	Ac_F/Ac_T	Tex.	Mineralogía de la fraccion arcilla $Ac_{\%}$	otras características (lámina delgada)
Ah	40.1	22.0	7.6	13.5	16.8	0.72	fa	V, I-V, Gb_1, H_{22}, I	
Bw	38.9	21.2	3.8	15.3	20.9	0.71	fpa	V, I-V, Gb_8, H_{48}, I	NO cutanes de Ac
C1	37.7	16.7	5.7	23.5	16.5	-	fa	Gb_8, H_{64}, I	
C2	48.9	13.1	8.1	17.2	12.8	-	fa	Gb_2, H_{56}, (I)	

Complejo de cambio

	$AcNH_4$ ($cmol_c/kg$)					KCl ($cmol_c/kg$)	CEC ($AcNH_4$)			CECe		
	Ca	Mg	K	Na	S	Al	T $cmol_c/kg$	V %	Al %	T $cmol_c/kg$	V %	Al %
Ah	0.18	0.08	0.12	0.21	0.59	2.98	11.89	5.0	25.1	3.57	16.5	83.5
Bw	0.13	0.10	0.16	0.19	0.58	2.27	3.39	17.1	67.0	2.85	20.4	79.6
C1	0.23	0.11	0.29	0.23	0.86	1.33	4.48	19.2	29.7	2.19	39.3	60.7
C2	0.21	0.14	0.23	0.33	0.91	1.52	6.63	13.7	22.9	2.43	37.4	62.6

	Ca/Mg	$\%K_S$	$\%Na_{CEC}$	$\%Na_{CECe}$	CEC/Ac ($cmol_c/kg$)	CECe/(Ac ($cmol_c/kg$)
Ah	2.3	20.3	1.8	5.9	-	-
Bw	1.3	27.6	5.6	6.7	16.2	13.6
C1	2.1	33.7	5.1	10.5	27.2	13.3
C2	1.5	25.3	5.0	13.6	51.8	19.0

Extracciones selectivas

	Fe_{DC} (%)	Fe_{ox} (%)	Fe_p (%)	Al_{DC} (%)	Al_{ox} (%)	Al_p (%)	C_p (%)	Si_{ox} (%)	$Al_{ox}+1/2Fe_{ox}$	Al_p/Al_{ox}	C_p/Al_p+Fe_p (M)
Ah.	0.84	0.49	0.48	0.81	0.62	0.81	2.2	0.04	0.87	1.31	4.7
Bw	1.05	0.51	0.36	0.34	0.33	0.33	0.4	0.03	0.59	1.00	-
C1	0.27	0.10	0.05	0.13	0.13	0.06	-	-	0.18	0.46	-
C2	0.09	0.01	0.00	0.07	0.07	0.03	-	-	0.08	0.43	-

%	Fe_{La} ($\%_{Fep}$)	Fe_{Cu-La} ($\%_{Fep}$)	Fe_{p-Cu} ($\%_{Fep}$)	Al_{La} ($\%_{Alp}$)	Al_{Cu-La} ($\%_{Alp}$)	Al_{p-Cu} ($\%_{Alp}$)
Ah.	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.48 (100)	0.08 (9.3)	0.27 (33)	0.46 (57.7)

Especiación del carbono orgánico

	C-b		C-s		C-p		C-o		C-n.o.	
	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$
Ah	0.23	3.1	0.2	0.01	1.9	29.8	2.3	30.2	2.6	36.7

Análisis total (%) (suelo seco al aire)

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	RTB $(Ca+Mg+K+Na)_T$ ($cmol_c/kg$)
Ah	51.43	14.54	2.74	1.11	0.28	3.04	1.43	132.1
Bw	51.43	18.32	3.82	0.52	0.43	4.31	1.02	119.1
C1	57.86	24.56	3.45	0.31	0.45	5.84	0.66	116.9
C2	62.14	22.67	2.49	0.25	0.40	6.43	0.70	120.0
Ra	63.57	15.30	2.23	1.39	0.58	6.59	1.97	282.4

Modificadores: **S d** e a K_1 K_3 Mg_1 Ca_1 E M
FAO(1990):
FAO(1998):
SOIL TAXONOMY (1999):

Perfil nº 1.2 (Granitos de La Fernandina-Linares, Jaén)

(J.A. Sanchez Garrido y E. Fernandez Ondoño)

INFORMACION ACERCA DEL SITIO DE LA MUESTRA

Ubicación: Cercano a la carretera de Linares a la Fernandina. A 400 m al NO
Coordenadas UTM: 30SVH485247
Altitud: 420 m
Posición fisiográfica: Pendiente convexa
Forma del terreno circundandante: Colinado.
Pendiente: Clase 3, inclinado
Uso del suelo: Encinar adehesado-Lentiscar
Fecha de observación: Noviembre 2000

INFORMACION ACERCA DEL SUELO

Material original:	Granito
Drenaje:	Clase 4. Bien drenado
Condiciones de humedad del suelo:	Seco desde la superficie
Pedregosidad:	Clase 0. Sin piedras
Afloramientos rocosos:	Clase 2. Rocoso
Evidencias de erosión:	Erosión hídrica laminar severa con algunas cárcavas

Horizontes	**Prof. (cm)**	**Descripción**
Ah	0-15	Estructura de bloques subangulares a migajosa, débil, fina, mediana y gruesa; poros intersticiales, finos, abundantes, tubulares finos al azar; sin fragmentos rocosos; abundante actividad biológica; muy abundanates raíces medias, finas y muy finas; límite neto y ligeramente ondulado.
Bw	15-60	Estructura moderada en bloques angulares y subangulares finos, medios y gruesos; abundantes poros inped vesiculares gruesos y tubulares finos, al azar, comunes poros exped tubulares, finos al azar; muy escasos fragmentos rocosos tamaño piedra poco alterados de granito; galerías de insectos; frecuentes raíces finas y muy finas; límite abrupto y ondulado.
C	60-80	Granito alterado

Perfil 1.2 (Granitos Linares-Jaén)

DATOS ANALÍTICOS

	pH_{H2O} (1:2.5)	pH_{KCl}	pH_{NaF} (2')	pH_{abras}	%C	%MO	%N	C/N	P_{Olsen} mg/kg
A	6.73	6.05	8.29	7.53	1.78	3.07	0.07	25.4	5.4
Bw	6.56	5.31	8.37	7.63	0.44	0.76	-	-	nd
C	6.87	5.39	8.44	7.34	0.24	0.41	-	-	nd
Roca a	-	-	-	7.71	-	-	-	-	nd
Roca f	-	-	-	7.99	-	-	-	-	nd

Análisis granulométrico

	%AG 2-0.2mm	%AF 0.2-0.05	%LG 0.05-0.02	%LF 0.02-0.002	$\%Ac_T$ <0.002	Textura	Mineralogía de la fraccion arcilla $Ac_{\%}$
A	48.7	19.7	8.1	11.8	11.7	fa	(H), I
Bw	50.9	19.0	6.1	12.3	11.7	fa	H_{16}, I
C	54.3	16.9	6.5	7.6	14.7	fa	H_{32}, I

Complejo de cambio

	$AcNH_4$ ($cmol_c/kg$)					KCl ($cmol_c/kg$)	CEC ($AcNH_4$)			CECe		
	Ca	Mg	K	Na	S	Al	T cmolc/kg	V %	Al %	T $cmol_c/kg$	V	Al
A	7.90	0.78	0.93	0.10	9.71	0.00	8.34	100	0.00	9.71	100	0.00
Bw	7.30	0.68	0.42	0.10	9.01	0.00	6.23	100	0.00	9.01	100	0.00
C	8.90	1.15	0.42	0.17	10.57	0.00	9.33	100	0.00	10.57	100	0.00

	Ca/Mg	$\%K_S$	$\%Na_{CEC}$	CEC/Ac ($cmol_c/kg$)	CECe/Ac ($cmol_c/kg$)
A	10.1	9.58	1.20	-	-
Bw	10.7	4.66	1.61	53.2	77.0
C	7.74	3.97	1.82	63.5	71.9

Extracciones selectivas

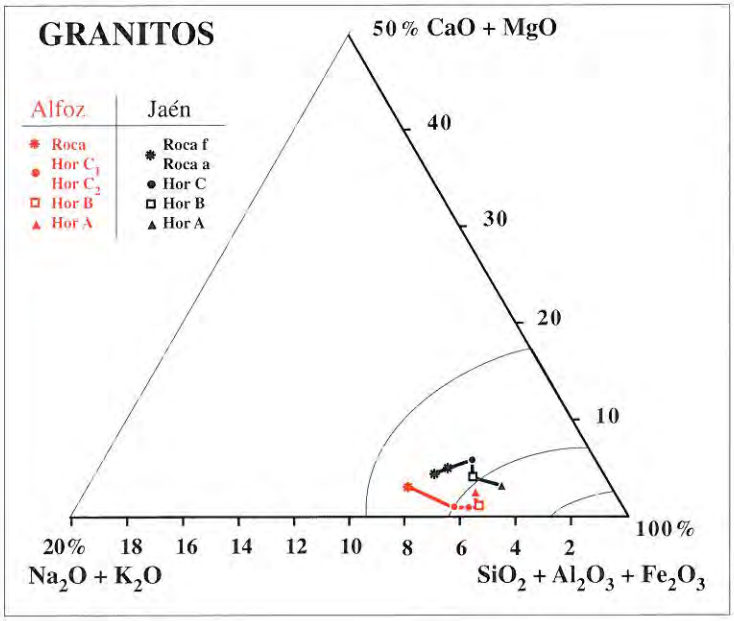
	Fe_{DC} (%)	Fe_{ox} (%)	Fe_p (%)	Al_{DC}(%)	Al_{ox} (%)	Al_p (%)	C_p (%)	Si_{ox} (%)	$Al_{ox}+1/2Fe_{ox}$	Al_p/Al_{ox}	Retención Fosfatos %	Indice Melánico	DOEO
A	0.28	0.06	0.01	0.04	0.04	0.01	0.5	-	0.07	0.4	2.5	2.0	0.02
Bw	0.37	0.03	0.01	0.04	0.04	0.01	-	-	0.06	0.4	-	-	-
C	0.32	0.02	0.00	0.05	0.05	0.01	-	-	0.06	0.2	-	-	-

%	Fe_{La} ($\%_{Fep}$)	Fe_{Cu-La} ($\%_{Fep}$)	Fe_{p-Cu} ($\%_{Fep}$)	Al_{La} ($\%_{Alp}$)	Al_{Cu-La} ($\%_{Alp}$)	Al_{p-Cu} ($\%_{Alp}$)
Ah.	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)

Análisis total (%) (suelo seco al aire)

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	RTB $(Ca+Mg+K+Na)_T$ ($cmol_c/kg$)
A	64.28	15.11	3.29	0.88	1.35	2.29	1.64	149.7
Bw	57.86	15.68	3.57	0.79	1.58	2.92	1.73	166.2
C	55.71	18.13	4.57	1.02	2.28	2.48	1.89	207.3
Ra	53.57	16.06	3.71	1.00	1.63	3.30	2.24	211.2
Rf	60.00	15.49	3.71	1.13	1.95	3.30	2.37	416.8

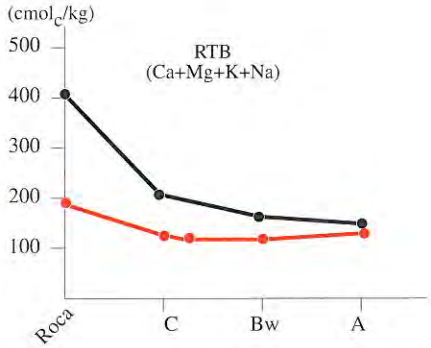
Modificadores: **S d E A**
FAO(1990):
FAO(1998):
SOIL TAXONOMY (1999):

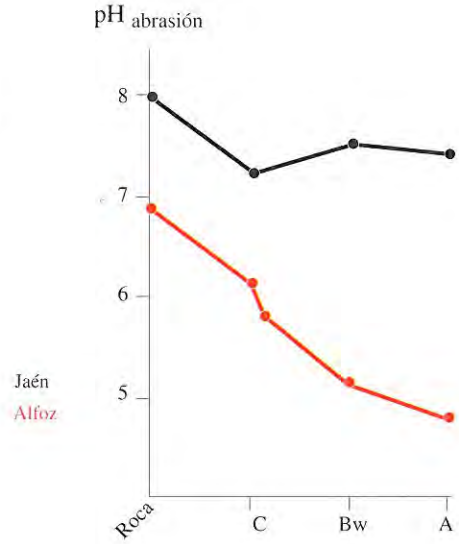


Evolución geoquímica e intensidad de la alteración (diagrama de Chesworth,1973)

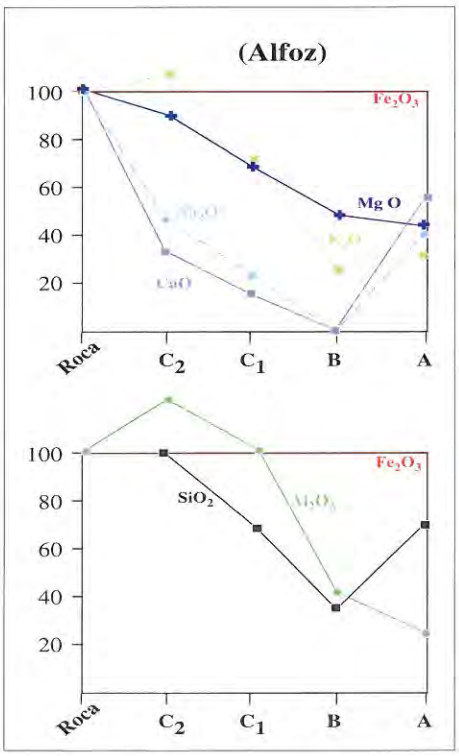
Templados

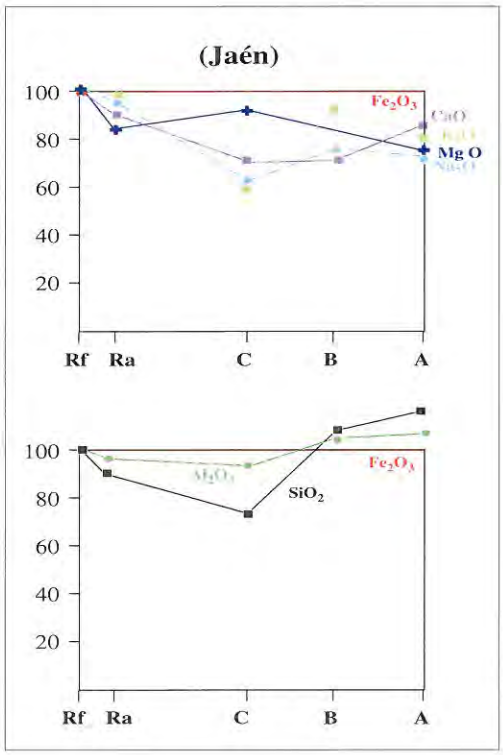
Tropicales y ecuatoriales





Reserva Total de Bases y pH de abrasión en los perfiles de alteración.





Balances geoquímicos (iso-Fe2O3)

Parámetros utilizados en la valoración de limitantes intrínsecos y extrínsecos de los suelos de Galicia. Propuesta metodológica realizada a partir del esquema de Buol et al., (1975) para la determinación de las Clases de Capacidad para el cultivo (Macías y Calvo de Anta, 1992)

MODIFICADORES

Textura de la capa arable	S- Arenoso; L- Franco; C- Arcilloso: O-orgánico
Pedregosidad	+:15-35%; *: >35% (considerando tamaños de pedregosidad >15 cm)
Factor g	Hidromorfía en la capa arable: >60 días en la mayoría de los años
Factor w	Elevado contenido de agua durante la mayor parte del año, sin que se produzcan condiciones de reducción
Facor d	Sequía >90 días no acumulaativos o más de 60 días consescutivos
Factor e	Baja capacidad de cambio de cationes ($CIC_{efectiva}$< $coml_c$/kg de suelo)
Factor a	Carácter álico (%Al_{CICe} >60)
Factor h	Acidez del suelo moderada a baja (%Al_{CICe} 60-20)
Factor P	Fuerte déficit de fósforo (P_{NaHCO3} < 5 mg/kg)
Factores X_1 y X_2	Alta fijación de fósforo por materiales no cristalinos de tipo alofano. Fuerte (X_1): Se aplica cuando $pH_{NaF\ 2'}$ >11 Moderada (X_2): $pH_{NaF\ 2'}$:10-11
Factor i	Alta fijación de fósforo por hidróxidos de Fe. Se aplica cuando %Fe2O3/%Arc illa >0.15 y hay >35% de arcilla
Factor v	Carácter vértico. >35% de arcilla y >50% de arcillas de tipo 2:1 hinchables o cuando la capa superior del suelo presenta procesos de contracción e hinchamiento
Factor K_1	Bajo contenido de K asimilable (<0.2 $cmol_c$/kg en el CIC)
Factor K_2	Fuerte desequilibrio entre K y otros cationes del complejo de cambio (<2% respecto de S)
Factor K_3	Riesgo de fijación de K (abundancia de arcillas vermiculíticas en la capa arable)
Factor Mg_1	Fuerte deficiencia de Mg (<0.4 $cmol_c$/kg en el CIC)
Factor Mg_2	Desequilibrio frente al Ca en el CIC (Ca/Mg>50)
Factor Ca_1	Fuerte deficiencia de Ca (<1.5 $cmol_c$/kg en el CIC)
Factor Ca_2	Ca/Mg <0.5
Factor b	Presencia de carbonato activo
Factor s	Salinidad ($CE_{Esaaturación}$ a 25°C >4 mmhos/cm dentro de los 100 cm superficiales)
Factor n	Na_{CIC} ?15%
Factor c	pH_{agua} <3.5 y contiene moteados de jarosita con hues de 2.5 Y o más amarillos y chroma de 6 o más, dentro de los 60 cm superficiales
Factores especiales	Otros, tales como carencias y/o toxicidades provocados por causas naturales o artificiales propias de ambientes muy localizados, no considerados anteriormente
Factor A	Afloramientos rocosos (Clases 2-5 definidas en FAO, 1977)
Factor E	Riesgos de erosión
Factor I	Riesgo de Inundación
Factor M	Impedimentos a la mecanización (en cuanto a transitabilidad o facilidad de laboreo. En este último caso de describen 6 tipos I-VI, segun Jones, 1979)

SUELOS SOBRE ROCAS CUARCÍTICAS

Perfil nº 2 (Areniscas de Ferreira)

INFORMACION ACERCA DEL SITIO DE LA MUESTRA

Ubicación: Desvío a Rua de la carretera de Ferreira a Cangas de Foz. E627783, N4826651 (Hoja 9 MTN)
Altitud: 260m
Posición fisiográfica: Ladera
Forma del terreno circundandante: Colinado. Pendientes máximas 16-30%
Pendiente: Clase 3
Uso del suelo: Forestal arbolado
Régimen de humedad: údico
Régimen de temperatura: mésico
Fecha de observación: 5 de abril, 2001

INFORMACION ACERCA DEL SUELO

Material original: Areniscas ortocuarcíticas del Xistral

Drenaje:	Clase 5. Algo excesivamente drenado
Condiciones de humedad del suelo:	Capacidad de campo
Pedregosidad:	Clase 1. Moderadamente pedregoso
Afloramientos rocosos:	Clase 1. Moderadamente rocoso
Evidencias de erosión:	Inexistententes.
Influencia humana:	Repoblación forestal, talas

Horizontes	**Prof. (cm)**	**Descripción**
Ah	0-21	Horizonte mineral rico en materia orgánica; gris muy oscuro 10YR3/1 (h) y gris oscuro 10YR4/1 (s); arenoso-franco; estructura migajosa fina, no adherente, no plástico, friable (h) y blando (s); muchas arenas sin recubrimientos coloidales, porosidad muy abundante y de distintos tamaños con predominio de los bioporos; raices finas y gruesas muy abundantes; limite neto e irregular.
E	21-32	Horizonte mineral, gris oscuro 10YR4/1 (h) y gris 10YR6/1 (s); arenoso, sin estructura, no adherente, no plástico; muy friable (h) y suelto (s), arenas sin recubrimientos; abundantes poros medianos a finos, escasas raices gruesas; límite neto irregular.
Bh	32-44	Horizonte mineral, pardo grisáceo muy oscuro 10YR3/2 (h) y pardo amarillento oscuro 10YR3/4 (s); franco-arcillo-arenoso; estructura migajosa fina; no plástico, no adherente, friable (h) y blando (s); abundantes poros de pequeño tamaño, escasas raices gruesas; límite gradual irregular.
Bs	44-70	Horizonte mineral, pardo amarillento oscuro 10YR4/4 (h) y pardo amarillento 10YR5/6 (s); franco-arenoso, con estructura migajosa fina, no plástico, no adherente, friable (h) y blando (s), muy escasas raices gruesas; límite difuso e irregular.
2Bt (B´t)	70-100	Horizonte mineral, amarillo parduzco 10YR6/8 (h) y amarillo 10YR7/6 (s), franco-arenoso, con estructura migajosa mediana, no plástico, no adherente, friable (h) y ligeramente duro (s), muy pocas raices gruesas. Límite gradual
2C		Horizonte mineral, amarillo parduzco 10YR6/6 (h) y pardo muy pálido 10YR7/4 (s), franco-arenoso, con estrucura masiva, no plástico, no adeherente, friable (h) y ligeramente duro (s).

DATOS ANALÍTICOS

	pH_{H2O} (1:2.5)	pH_{H2O} (1:1)	pH_{KCl}	pH_{NaF} (2')	%C	%MO	%N	C/N	P_{Olsen} mg/kg
Ah	4.09	3.87	3.40	7.98	6.74	11.62	0.31	21.7	3.6
E	4.34	4.17	3.64	8.03	0.82	1.41	<0.05	-	nd
Bh	4.36	4.31	4.05	10.42	5.64	8.69	0.28	20.1	nd
Bs	4.52	4.52	4.33	9.48	0.72	9.72	<0.05	-	nd
2Bt	4.39	4.43	4.16	8.97	0.20	1.24	<0.05		nd
2C	4.30	4.33	4.08	8.98	0.17	0.30	<0.05	-	nd

Perfil nº 2 (Areniscas de Ferreira)

Análisis granulométrico

	%ArG 2-0.2mm	%ArF 0.2-0.05	%LG 0.05-0.02	%LF 0.02-0.002	%Ac_T <0.002	Textura	Mineralogía de la fraccion arcilla	otras características (lámina delgada)
Ah	39.6	45.6	2.5	5.9	6.5	af	(H), (I), Q	
E	41.4	49.3	2.1	3.8	3.4	a	(H), (I), Q	
Bh	31.4	37.8	1.2	5.1	24.6	fpa	H, Q	revestimientos de m.o...
Bs	22.1	50.6	4.7	7.6	15.0	fa	(V), H, (Gb), (I), Q	
2Bt	30.1	40.1	8.6	6.2	15.1	fa	K, (Gb),(I), Q	cutanes de Ac orientada en huecos
2C	28.7	42.7	6.5	5.6	16.4	fa	K, (I), Q	

Complejo de cambio

	$AcNH_4$ $cmol_c/kg$					KCl ($cmol_c/kg$)		CEC $AcNH_4$				CECe			
	Ca	Mg	K	Na	S	Al	H^+	T H cmolc/kg	V %	Al %	H %	T cmolc/kg	V %	Al %	H %
Ah	0.13	0.38	0.20	0.21	0.92	3.72	8.52	17.75	5.1	21.0	48.0	13.16	7.0	28.3	64.7
E	0.06	0.07	0.03	0.09	0.25	0.20	4.22	6.11	4.1	3.3	69.1	4.67	5.3	4.3	90.4
Bh	0.11	0.11	0.11	0.20	0.53	0.56	5.01	20.7	2.6	2.7	24.2	7.10	7.5	7.9	84.6
Bs	0.04	0.03	0.05	0.07	0.19	0.26	0.04	3.00	6.3	8.7	1.3	0.49	38.8	53.1	8.2
2Bt	0.05	0.12	0.05	0.15	0.37	0.43	-	3.01	12.3	14.3	-	0.80	46.2	53.8	-
2C	0.03	0.08	0.06	0.15	0.32	0.53	0.10	3.45	9.3	15.4	2.9	0.95	33.7	55.8	10.5

	Ca/Mg	$\%K_S$	$\%Na_{CEC}$	CEC /Ac ($cmol_c/kg$)	CECe /Ac ($cmol_c/kg$)	Extracto agua (1:1) (t = 4días)			
						Al (mmol/L)	Si (mmol/L)	TOC (mmol/L)	Co/Al
Ah	0.34	21.7	2.15	-	-	0.6	0.3	38.7	64.5
E	0.86	12.0	4.26	62.1	137.4	nd	nd	nd	nd
Bh	1.00	20.8	0.97	84.1	28.9	0.07	0.08	14.3	204.3
Bs	1.33	26.3	2.33	20.0	3.3				
2Bt	0.42	13.5	4.98	19.9	5.3				
2C	0.38	18.8	4.35	21.0	5.8				

Extracciones selectivas

	Fe_{DC} (%)	Fe_{ox} (%)	Fe_p (%)	Al_{DC} (%)	Al_{ox} (%)	Al_p (%)	C_p (%)	Si_{ox} (%)	$Al_{ox}+1/2Fe_{ox}$	Al_p/Al_{ox}	Retención Fosfatos %	Indice Melánico	DOEO
Ah	0.27	0.19	0.15	0.18	0.17	0.18	2.3	-	0.27	1.06	23	1.6	0.23
E	0.12	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.4	-	0.08	1.00	-	-	0.06
Bh	1.98	1.70	1.50	1.08	1.03	1.08	2.4	-	1.88	1.05	-	-	1.16
Bs	0.67	0.22	0.21	0.27	0.23	0.21	0.3	-	0.34	0.91	-	-	0.07
2Bt	0.16	0.07	0.15	0.13	0.13	0.11	-	-	0.17	0.85	-	-	0.01
2C	0.70	0.22	0.16	0.19	0.18	0.14	-	-	0.29	0.78	-	-	0.04

%	Fe_{La} ($\%_{Fep}$)	Fe_{Cu-La} ($\%_{Fep}$)	Fe_{p-Cu} ($\%_{Fep}$)	Al_{La} ($\%_{Alp}$)	Al_{Cu-La} ($\%_{Alp}$)	Al_{p-Cu} ($\%_{Alp}$)	C_p/Al_p+Fe_p (M)
Ah	0.015 (10)	0.015 (10)	0.12 (80)	0.07 (37)	0.09 (50)	0.025 (13)	19.2
Bh	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	1.08 (100)	0.14 (13)	0.36 (33)	0.86 (54)	2.9

Especiación del carbono orgánico

	C-b		C-s		C-p		C-o		C-n.o.	
	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$
Ah	0.04	0.6	0.03	0.4	2.27	33.7	2.92	43.3	1.48	22.0
Bh	0.07	1.2	0.01	0.2	1.78	31.6	3.26	58.0	0.50	9.0

MnDC: <4ppm en todos

Modificadores: **S d a P (K_1) Ca_1 (Ca_2)Mg_1 E M**

FAO(1990):

FAO(1998):

SOIL TAXONOMY (1999):

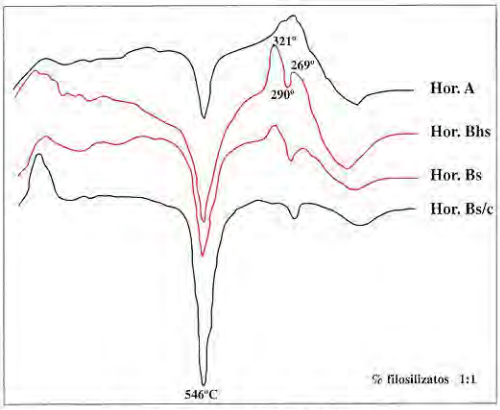
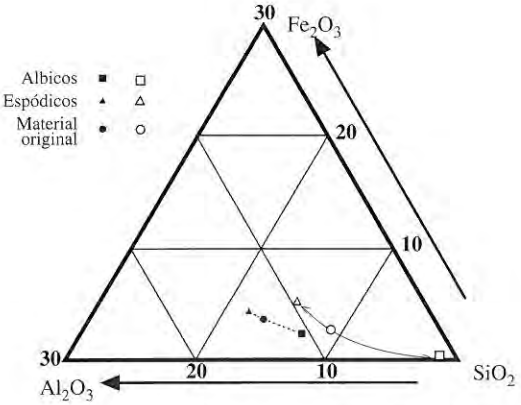


Diagrama de ATD de la arcilla



Comparación de la composición de podsoles boreales del norte de Ontario (• ▪ ▲) con la de Podsoles órticos del norte de España (○ □ △)

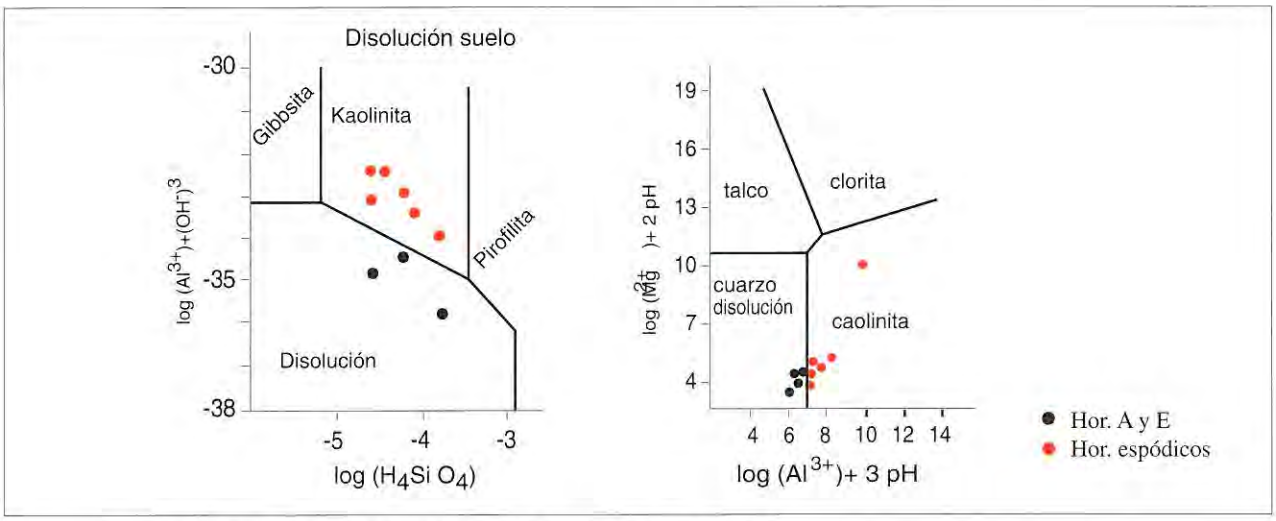
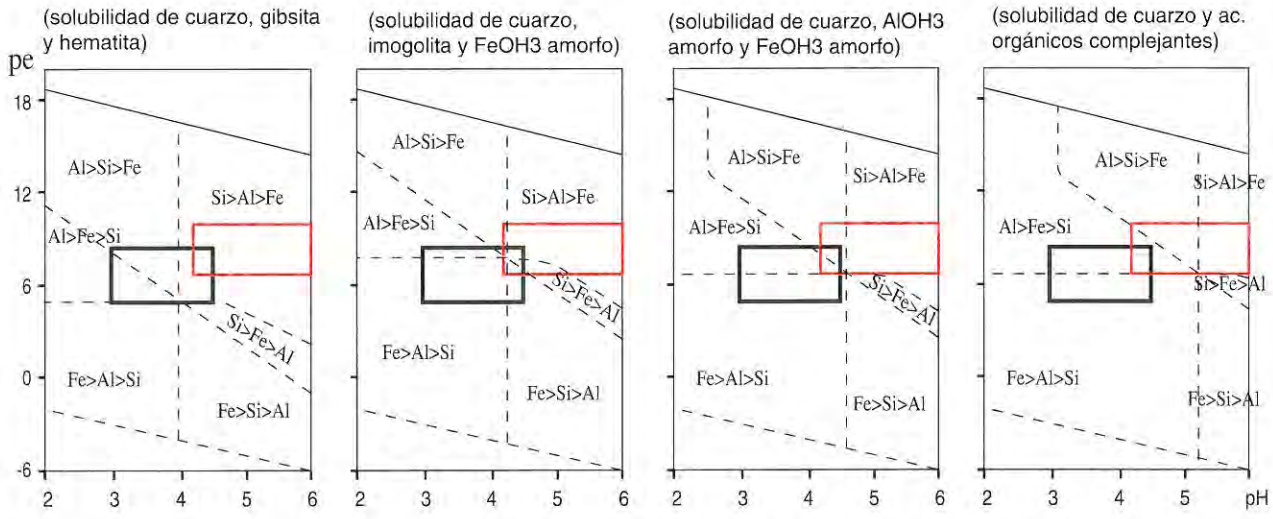
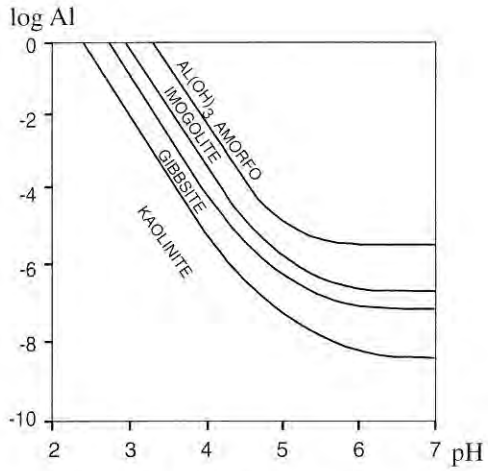


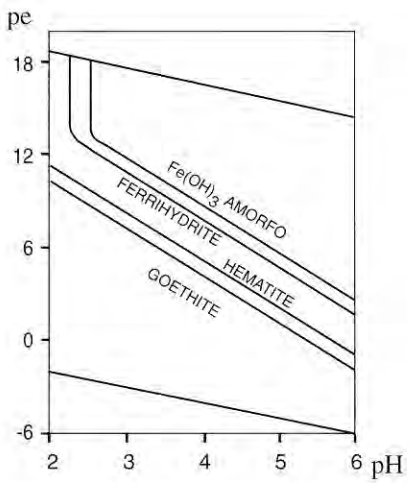
Diagrama de equilibrio del sistema (a): SiO_2 -Al_2O_3 -H_2O a 12°C;
(b): SiO_2 -Al_2O_3 -MgO-H_2O (sílice como compuesto invariante)
(Macías, F. Marcos y Chesworth, 1987)



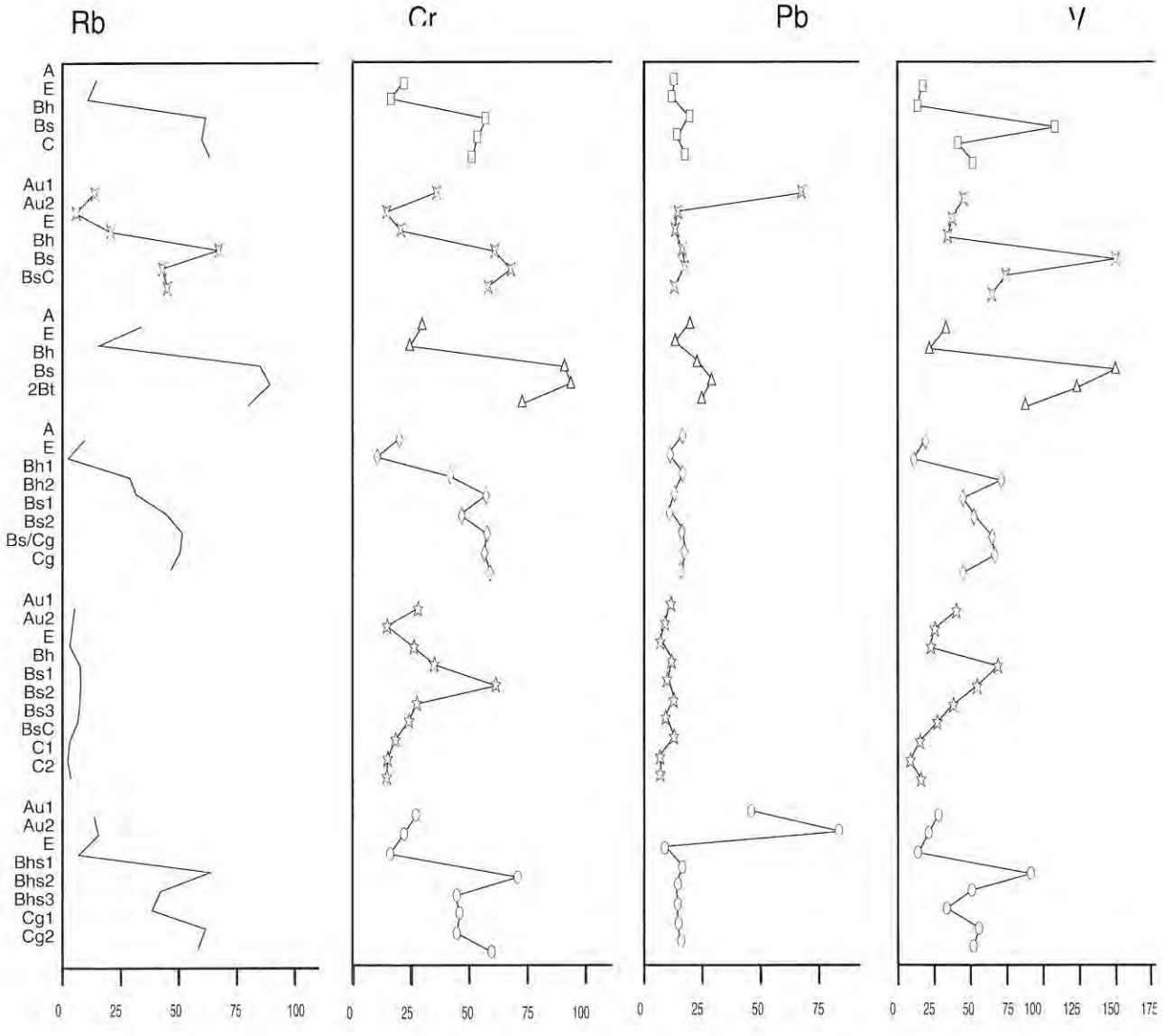
Secuencias de movilidad de Si, Al y Fe deducidas de la solubidad de diferentes minerales (siguiendo el método de Norton y las energías libres de Gibbs recopiladas por Lindsay, 1979)(Chesworth y Macías, 1985)



Curvas de solubilidad de diferentes especies Al



Curvas de solubilidad de diferentes especies Fe
(las líneas representan disoluciones 10^{-4} M)



Variación vertical de la concentración de Rb Cr, V y Pb en 6 Podsoles de Galicia
(Acibro, Castañeiras, Burela, Abanillas, Roupar y Tol) (mg/kg) (Chesworth et al., 1998).

Perfil nº 3 (Areniscas del Montouto)

INFORMACION ACERCA DEL SITIO DE LA MUESTRA

Ubicación: Posición Alto del Montouto. E617001, N4811402 (Hoja 23 MTN)
Altitud: 860 m
Posición fisiográfica: Ladera
Forma del terreno circundandante: Montañoso. Pendientes máximas >30% y fuertes desniveles
Pendiente: Clase 5
Uso del suelo: Pastizal
Régimen de humedad: Acuico en condiciones naturales. Aérico por apertura de la carretera.
Régimen de temperatura: mésico

INFORMACION ACERCA DEL SUELO

Material original:	Coluvión periglaciar de areniscas ortocuarcitas
Drenaje:	Clase 3 en superficie. En profundidad drenaje vertical impedido y lateral lento. Modificado antrópicamente
Condiciones de humedad del suelo:	Capacidad de campo
Pedregosidad:	Clase 3. Muy pedregoso.
Afloramientos rocosos:	Clase 1. Moderadamente rocoso
Evidencias de erosión:	Movimientos de ladera.
Influencia humana	Transformación de brezal en praderas, fertilización, quema, pastoreo, drenaje.

Horizontes	**Prof. (cm)**	**Descripción**
Ah	0-20	Horizonte mineral rico en materia orgánica; negro 7.5YR2.5/1 (h) y gris muy oscuro 7.5YR3/1 (s); arenoso-franco; estructura migajosa fina; no adherente, no plástico, friable (h) y blando (s); porosidad muy abundante y de distintos tamaños con predominio de los bioporos; raices finas muy abundantes; limite gradual e irregular.
AE	20-44	Horizonte mineral, gris muy oscuro 7.5YR3/1 (h) y gris oscuro 7.5YR4/1 (s); arenoso-franco; débil estructura migajosa fina; no adherente, no plástico, friable (h) y blando (s); abundantes poros medianos a finos; muy pedregoso con gravas de arenisca cuarcítica; límite neto irregular.
Bsg	44-80	Horizonte mineral de tipo *orstein* con zonas rojo oscuro 2.5 YR 3/6 y otras de color amarillo oliva 2.5Y6/8, las primeras con cierta cementación variable e irregular con estructura migajosa fina en seco y, las segundas, con estructura masiva en húmedo pero suelta en seco; franco-arenoso, no plástico, no adherente; escasa porosidad, límite difuso irregular. En algunas zonas se forma un horizonte *plácico* acompañando o no al *orstein*.
Cg	>80	Horizonte mineral, pardo muy pálido 10YR7/4 (h) y 10YR8/3 (s) con moteados oliva 2.5Y678, franco arenoso, ligeramente cementado, no plástico, no adherente.

DATOS ANALÍTICOS

	pH_{H2O} (1:2.5)	pH_{H2O} (1:1)	pH_{KCl}	pH_{NaF} (2')	%C	%MO	%N	C/N	P_{Olsen} mg/kg
Ah	4.24	4.10	4.43	7.90	6.73	11.60	0.29	15.7	4.9
AE	4.27	4.09	4.18	8.01	3.62	6.24	0.11	13.9	2.9
Bs	4.62	4.55	3.99	8.57	1.29	2.07	0.08	16.1	-
Cg_1	4.71	4.52	4.00	8.32	0.09	0.16	<0.05	-	-
Cg_2	4.72	4.71	3.80	8.27	0.48	0.83	0.05	-	-
Placa	4.71	4.70	4.06	8.68	1.11	1.91	<0.05	-	-

Perfil nº 3 (Areniscas del Montouto)

Análisis granulométrico

	%AG 2-0.2mm	%AF 0.2-0.05	%LG 0.05-0.02	%LF 0.02-0.002	$\%Ac_T$ <0.002	Textura	Mineralogía de la fraccion arcilla
Ah	29.3	50.4	3.1	7.5	9.7	af	K, (I),Q
AE	40.6	37.2	8.3	6.7	7.2	af	K, (I),Q
Bs	36.8	41.5	7.1	7.8	7.0	af	(V) K, (Go), (I), Q
Cg_1	40.8	14.9	6.6	22.4	15.3	fa	K, (Go), (I), Q
Cg_2	25.1	43.6	5.9	18.5	6.9	fa	K, (Go), (I), Q
Placa	-	-	-	-	-	-	(K), Am, Q

Complejo de cambio

	$AcNH_4$ ($cmol_c/kg$)					KCl ($cmol_c/kg$)		CEC $AcNH_4$				CECe			
	Ca	Mg	K	Na	S	Al	H^+	T cmolc/kg	V %	Al %	H^+ %	T cmolc/kg	V %	Al %	H^+ %
Ah	0.29	0.25	0.07	0.12	0.73	3.83	2.03	7.80	9.4	49.1	26.0	6.59	11.1	58.1	30.8
AE	0.07	0.08	0.06	0.23	0.44	2.72	2.29	5.77	7.6	47.1	39.7	5.45	8.1	49.9	42.0
Bs	0.11	0.18	013	0.20	0.62	0.68	0.41	1.76	35.2	38.6	23.3	1.71	36.2	39.8	24.0
Cg_1	0.11	0.09	0.03	0.09	0.32	2.67	1.00	4.70	6.8	56.8	21.3	3.99	8.0	66.9	25.1
Cg_2	0.15	0.08	0.04	0.07	0.34	2.57	1.04	7.02	4.6	36.6	14.8	3.95	8.6	65.1	26.3

	Ca/Mg	$\%K_S$	$\%Na_{CEC}$	CEC/Ac) ($cmol_c/kg$)	Extracto agua (1:1) (t=4 días)			
					Al (mmol/L)	Si (mmol/L)	TOC (mmol/L)	Co/Al
Ah	1.2	9.6	1.5	-	0.03	0.1	16.7	557.0
AE	0.9	13.6	4.0	-	0.01	0.02	5.2	520.0
Bs	0.6	21.0	11.4	25.1	0.1	0.06	3.6	36.0
Cg	1.2	9.4	1.9	30.7	-	-	-	-
Cg_2	1.9	13.3	1.0	101.7	-	-	-	-

Extracciones selectivas

	Fe_{DC} (%)	Fe_{ox} (%)	Fe_p (%)	Al_{DC} (%)	Al_{ox} (%)	Al_p (%)	C_p (%)	Si_{ox} (%)	$Al_{ox}+1/2Fe_{ox}$	Al_p/Al_{ox}	Retención Fosfatos %	Indice Melánico	DOEO
Ah	0.13	0.10	0.07	012	0.12	0.06	2.82	<0.02	0.17	0.50	19	1.5	0.04
AE	0.17	0.09	0.08	0.10	0.07	0.07	1.20	-	0.12	1.00	13	1.5	0.04
Bs	4.46	1.11	0.78	0.34	0.12	0.11	1.08	-	0.68	0.92	-	-	0.17
Cg_1	0.15	0.05	0.06	0.04	0.02	0.03	-	-	0.05	1.50	-	-	0.02
Cg_2	0.13	0.05	0.04	0.08	0.05	0.05	-	-	0.08	1.00	-	-	0.09
Placa	4.27	2.67	1.39	0.36	0.36	0.17	1.11		1.70	0.47	-	-	-

%	Fe_{La} ($\%_{Fep}$)	Fe_{Cu-La} ($\%_{Fep}$)	Fe_{p-Cu} ($\%_{Fep}$)	Al_{La} ($\%_{Alp}$)	Al_{Cu-La} ($\%_{Alp}$)	Al_{p-Cu} ($\%_{Alp}$)	C_p/Al_p+Fe_p (M)
Ah	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.068 (100)	0.02 (35)	0.03 (45)	0.01 (20)	78

Especiación del carbono orgánico

	C-b		C-s		C-p		C-o		C-n.o.	
	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$
Ah	0.04	0.6	0.03	0.4	2.75	40.9	3.71	55.1	0.20	3.0

Composición de Acidos fúlvicos y húmicos

	g/kg (suelo)	PM (medio)	%C	%N	%O	%H	H/C	O/C	C/N
Ah AF	0.6	-	52.4	2.7	40.0	5.0	0.10	0.76	19.4
AH	65.0	-	57.7	3.3	35.1	3.9	0.07	0.61	17.5

MnDC:<4ppm en todos

Placa: Fe_T=4%; Al_T:1.07%; Mn_T:33ppm;

Modificadores: **S g a P K_1 Ca_1 Mg_1 E M (aérico)**

FAO(1990).

FAO(1998).

SOIL TAXONOMY (1999).

SUELOS ORGÁNICOS

Perfil nº 4 (Turbera ombrotrófica del Montouto)

INFORMACION ACERCA DEL SITIO DE LA MUESTRA

Ubicación: Alto de Montouto (Sierra del Xistral). E615837 N4812931 (Hoja 23 MTN)
Altitud: 970m
Posición fisiográfica: cumbre aplanda
Forma del terreno circuandante: Ondulado. Pendientes máximas 2-8%
Pendiente: Clase 2
Uso del suelo: Pastizal-Brezal
Régimen de humedad: Acuico en profundidad
Régimen de temperatura: mésico
Fecha de observación: 20 de mayo, 2001

INFORMACION ACERCA DEL SUELO

Material original:	Restos orgánicos sobre canchal de areniscas ortocuarcíticas periglaciares
Drenaje:	Clase 1. Escasamente drenado en húmedo
Condiciones de humedad del suelo:	Perfil húmedo en su totalidad
Profundidad de la capa freática:	Variable (> 1.70 m)
Pedregosidad:	Clase 0. Sin piedras.
Afloramientos rocosos:	Clase 0. Sin afloramientos rocosos
Evidencias de erosión:	Frentes de erosión.
Influencia humana:	Pastoreo.estacional

Horizontes	**Prof. (cm)**	**Descripción**
H_1	10-60	Horizonte orgánico *sáprico* (fibras < 1/6 del volumen) con un ligero enriquecimiento de fibras en los 40 cm superficiales; de color negro 7.5YR2.5/1 (h) y pardo oscuro 7.5YR3/2 (s) y y extracto de pirofosfato de coloración amarillo parduzco 10YR6/6; no adherente y no plástico, friable en húmedo y duro en seco; abundante porosidad con predominio de las grietas de retracción; raices en superficie; límite inapreciable.
H_2	60-120	Horizonte orgánico *sáprico* (fibras < 1/6 del volumen), de color negro 10YR2/1 (h) y pardo muy oscuro 7.5YR3/2 (s) y extracto de pirofosfato de coloración amarillo parduzco 10YR6/6; no adherente y no plástico; friable en húmedo y duro en seco; poros poco frecuentes; raices escasas; límite gradual plano
H_3	>120	Horizonte orgánico *sáprico* (fibras < 1/6 del volumen), pardo muy oscuro 7.5YR2.5/2 (h) y pardo oscuro 10YR2/2 (s), extracto de pirofosfato amarillo parduzco 10YR6/6; ligeramente adherente y plástico; muy friable y blando; límite neto. Agua intersticial: pH: 4.2 y Eh: 240 mvol.

DATOS ANALÍTICOS

	pH_{H2O} (1:2.5)	pH_{KCl}	pH_{NaF} (2')	%C	%MO	%N	%S	C/N
H_1	3.75	2.68	7.50	54.41	93.80	1.65	0.33	33.0
H_2	4.00	2.82	7.68	53.28	91.85	1.52	0.30	35.1
H_3	3.81	2.70	7.84	53.44	92.13	1.07	0.25	49.9

	P_{Olsen} mg/kg	%fibras >150µ	Color E.pirofosfato (P.saturada)
H_1	2.10	<1/6	10YR6/6
H_2	nd	<1/6	10YR6/6
H_3	nd	<1/6	10YR6/6

Perfil nº 4 (Turbera del Montouto)

Complejo de cambio

	$AcNH_4$ ($cmol_c/kg$)					KCl ($cmol_c/kg$)		CEC $AcNH_4$				CECe			
	Ca	Mg	K	Na	S	Al	H^+	T $cmol_c/kg$	V %	Al %	H %	T $cmol_c/kg$	V %	Al %	H %
H_1	0.30	0.25	0.11	0.87	1.53	2.09	3.44	53.82	2.8	3.9 -	6.4 -	7.06	22	30	48
H_2	0.39	0.25	0.05	0.64	1.33	1.69	0.25	49.87	2.7	3.4	0.01	3.27	41	52	7
H_3	0.05	0.07	0.03	0.42	0.57	0.84	1.03	35.10	1.6	2.4	2.9	2.44	23	34	42

	Ca/Mg	$\%K_S$
H_1	1.2	7.2
H_2	1.6	3.8
>120	0.7	5.3

Extracciones selectivas

	Fe_{DC} (%)	Fe_{ox} (%)	Fe_p (%)	Al_D (%)	Al_{ox} (%)	Al_p (%)	C_p (%)	Si_{ox} (%)	$Al_{ox}+1/2Fe_{ox}$	Al_p/Al_{ox}	Retención Fosfatos %	I.meláni co	DOEO
H_1	0.04	0.04	0.02	0.18	0.15	0.18	6.1	<0.02	0.170	1.20	10	1.84	0.004
H_2	0.08	0.05	0.02	0.17	0.16	0.17	5.2	-	0.185	1.06	-	-	-
H_3	0.06	0.05	0.02	0.11	0.09	0.11	3.8	-	0.115	1.22	-	-	-

%	Fe_{La} ($\%_{Fep}$)	Fe_{Cu-La} ($\%_{Fep}$)	Fe_{p-Cu} ($\%_{Fep}$)	Al_{La} ($\%_{Alp}$)	Al_{Cu-La} ($\%_{Alp}$)	Al_{p-Cu} ($\%_{Alp}$)	C_p/Al_p+Fe_p (M)
H_1	0.004 (20)	0.001 (5)	0.015 (75)	0.057 (32)	0.053 (29)	0.070 (39)	68.6
H_2	0.006 (30)	0.001 (2)	0.013 (68)	0.048 (28)	0.042 (25)	0.080 (47)	67.7
H_3	0.007 (35)	0.009 (45)	0.004 (20)	0.025 (23)	0.039 (36)	0.046 (41)	72.0

Especiación del carbono orgánico

	C-b		C-s		C-p		C-o		C-n.o.	
	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$
H_1	0.18	0.3	0.45	0.8	5.43	10.0	40.02	73.6	8.33	15.3
H_2	0.10	0.2	0.42	0.8	4.68	8.8	39.00	73.2	9.13	17.0
H_3	0.04	0.0	0.40	0.7	3.36	6.3	37.48	70.1	12.16	22.9

Composición de Acidos fúlvicos y húmicos

	g/kg (suelo)	PM (medio)	%C	%N	%O	%H	H/C	O/C	C/N
H1 AF	0.2	2075	51.4	2.7	40.7	5.2	0.10	0.79	19.0
AH	20	2866	55.3	2.0	37.3	5.3	0.10	0.67	27.7
H3 AF	0.8	1895	52.9	1.4	41.1	4.6	0.09	0.78	37.8
AH	10	2749	57.4	1.9	35.6	5.0	0.09	0.62	30.2

Disolución del suelo y arroyos (valores medios en distintas fechas 1999-2001) (mg/L)

	pH	CE µS/cm	Eh mv	C_T	C_o	Cl	NO_3^-	SO_4^{2-}	PO_4^{3-}	F^-
H1	5.02	125	353	16.8	14.0	6.4	0.33	2.08	0.52	0.05
H3	5.44	63	240	12.5	12.5	14.2	1.31	3.86	0.53	0.04
Arroyos	4.0-6.4	23-50	412-642	0.1-8.9	-	4.4-6.8	0.2-2.0	0.6-5.0	-	-

	Al	Fe	Ca	Mg	Na	K	NH_4
H1	0.53	0.13	1.34	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
H3	0.62	0.14	3.23	0.27	11.9	0.22	0.09
Arroyos	0.08-0.17	0.03-0.19	0.1-2.1	0.1-1.0	2.3-5.6	0.14-0.9	-

Modificadores: **O g a P (K_1) Ca_1 Mg_1 E**

FAO(1990).
FAO(1998).
SOIL TAXONOMY (1999).

Perfil nº 5 (Turbera Mineralotrófica del Eume)

INFORMACION ACERCA DEL SITIO DE LA MUESTRA

Ubicación: Nacimiento del Eume. E616487, N4 811082 (Hoja 23 MTN)
Altitud: 770 m
Posición fisiográfica: Depresión
Forma del terreno circundandante: Plano o casi plano. Pendientes máximas 2%
Pendiente: Clase 1
Uso del suelo: Brezal de Ericáceas
Régimen de humedad: Acuico en profundidad
Régimen de temperatura: mésico
Fecha de observación: 20 de mayo, 2001

INFORMACION ACERCA DEL SUELO

Material original:	Restos orgánicos sobre arenas cuarzosas
Drenaje:	Clase 1. Escasamente drenado
Condiciones de humedad del suelo:	Perfil húmedo en su totalidad
Profundidad de la capa freática:	Variable (0-1.70 m)
Pedregosidad:	Clase 0. Sin piedras.
Afloramientos rocosos:	Clase 0. Sin afloramientos rocosos
Evidencias de erosión:	Erosión hídrica líneal
Influencia humana:	Pastoreo estacional

Horizontes	**Prof. (cm)**	**Descripción**
H_1	10-60	Horizonte orgánico *sáprico* (fibras < 1/6 del volumen) con un ligero enriquecimiento de fibras en los 20-40 cm superficiales, de color negro 7.5YR2.5/1 (h) y pardo muy oscuro 7.5YR2.5/2 (s) y extracto de pirofosfato de coloración amarillo parduzco 10YR6/6; estructura masiva en húmedo; no adherente y no plástico; friable en húmedo y muy duro en seco; abundante porosidad con predominio de las grietas de retracción, raices superficiales abundantes; límite inapreciable.
H_2	60-120	Horizonte orgánico *sáprico* (fibras < 1/6 del volumen), de color negro 7.5YR2.5/2 (h) y pardo oscuro 7.5YR3/3 (s) y extracto de pirofosfato de coloración amarillo parduzco 10YR6/6; masivo; no adherente y no plástico; friable en húmedo y duro en seco; poros poco frecuentes con predominio de las grietas de retracción; muy pocas raíces gruesas; límite gradual plano
Cr	>120	Horizonte mineral rico en materia orgánica muy descompuesta; negro 2.5/2.5 (h) y gris muy oscuro N3/3 (s), extracto de pirofosfato pardo muy oscuro 10YR2/2; masivo, friable en húmedo y muy duro en seco; olor a sulfuros; límite no determinado.

Perfil nº 5 (Turbera del Eume)

DATOS ANALÍTICOS

	pH_{H2O} (1:2.5)	pH_{KCl}	pH_{NaF} (2')	%C	%MO	%N	C/N
H_1	4.57	3.42	7.71	50.26	86.65	1.82	27.6
H_2	4.31	3.02	6.85	45.51	78.46	1.55	29.4
Cr	3.93	2.84	6.77	5.82	10.04	0.40	14.6

	P_{Olsen} mg/kg	%fibras >150µ	Color E.pirofosfato (P. saturada)
H_1	8.94	<1/6	10YR6/6
H_2	nd	<1/10	10YR6/6
Cr	nd	<1/10	10YR2/2

Complejo de cambio

	$AcNH_4$ ($cmol_c/kg$)					KCl ($cmol_c/kg$)		CEC $AcNH_4$				CECe			
	Ca	Mg	K	Na	S	Al	H^+	T $cmol_c/kg$	V %	Al %	H^+ %	T $cmol_c/kg$	V %	Al %	H^+ %
H_1	0.06	0.17	0.02	0.39	0.64	2.44	1.45	44.46	1.4	5.5	3.3	4.53	14	54	32
H_2	0.29	0.33	0.04	0.39	1.05	2.74	3.03	40.56	2.6	6.8	7.5	6.82	15	40	45
Cr	0.32	0.33	0.14	0.39	1.18	1.94	0.65	30.42	3.9	6.4	2.1	3.77	31	51	17

	Ca/Mg	$\%K_S$
H_1	0.35	3.1
H_2	0.88	3.8
Cr	1.00	11.9

Extracciones selectivas

	Fe_{DC} (%)	Fe_{ox} (%)	Fe_p (%)	Al_{DC} (%)	Al_{ox} (%)	Al_p (%)	C_p (%)	Si_{ox} (%)	$Al_{ox}+1/2Fe_{ox}$	Al_p/Al_{ox}	Retención Fosfato (%)	Indice Melánico	DOEO
H_1	0.03	0.03	0.03	0.26	0.24	0.26	5.0	-	0.26	1.1	15	1.75	0.01
H_2	0.09	0.09	0.07	0.22	0.18	0.22	2.5	-	0.23	1.2	-	-	-
Cr	0.18	0.17	0.15	0.15	0.15	0.15	1.1	-	0.23	1	-	-	-

%	Fe_{La} ($\%_{Fep}$)	Fe_{Cu-La} ($\%_{Fep}$)	Fe_{p-Cu} ($\%_{Fep}$)	Al_{La} ($\%_{Alp}$)	Al_{Cu-La} ($\%_{Alp}$)	Al_{p-Cu} ($\%_{Alp}$)	C_p/Al_p+Fe_p (M)
H_1	0.014 (47)	0.013 (43)	0.003 (10)	0.076 (29)	0.106 (41)	0.078 (30)	39.7
H_2	0.013 (19)	0.013 (19)	0.044 (62)	0.075 (34)	0.097 (44)	0.048 (22)	23.1
Cr	0.001 (3)	0.00 (0.0)	0.143 (97)	0.066 (44)	0.062 (41)	0.017 (15)	11.5

Especiación del carbono orgánico

	C-b		C-s		C-p		C-o		C-n.o.	
	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$
H_1	0.07	0.1	0.61	1.2	4.32	8.6	44.9	89.3	0.4	0.8
H_2	0.05	0.1	0.49	1.1	1.96	4.3	31.1	68.3	11.9	26.2
Cr	0.02	0.3	0.14	2.4	0.94	16.2	4.3	73.0	0.5	8.1

Modificadores: **O g a P K_1 Ca_1 Ca_2 Mg_1 E I**
FAO(1990).
FAO(1998).
SOIL TAXONOMY (1999).

SUELOS SOBRE ROCAS BÁSICAS

Perfil nº 6.1 (Anfibolitas de San Clodio)

INFORMACION ACERCA DEL SITIO DE LA MUESTRA

Ubicación: San Clodio. E589262 N4835159 (Hoja 7 MTN)
Altitud: 120 m
Posición fisiográfica: Ladera
Forma del terreno circundandante: Fuertemente ondulado. Pendientes máximas 16-30%
Pendiente: Clase 3
Uso del suelo: Forestal arbolado
Régimen de humedad: údico
Régimen de temperatura: mésico
Fecha de observación: 20 de mayo, 2001

INFORMACION ACERCA DEL SUELO

Material original:	Rocas metabásicas de facies anfibolita
Drenaje:	Clase 4. Bien drenado
Condiciones de humedad del suelo:	Capacidad de campo
Profundidad de la capa freática:	Desconocida (< 5m)
Pedregosidad superficial:	Clase 0. Sin piedras.
Afloramientos rocosos:	Clase 0. Ninguna o muy poca rocosidad
Evidencias de erosión:	Inexistententes.
Influencia humana:	Repoblación forestal, talas

Horizontes	**Prof. (cm)**	**Descripción**
Ah	0-26	Horizonte mineral rico en materia orgánica, pardo oscuro 7.5YR3/2 (h) y pardo 7.5YR4/3 (s); franco-arcillo-arenoso, estructura migajosa fina, untuoso y ligeramente tixotrópico (h), hidrófobo (s), porosidad muy abundante y de distintos tamaños con predominio de los bioporos, algunas fragmentos de rocas escasamente alteradas, abundantes raices finas y gruesas, limite gradual irregular.
Bw	26-70	Horizonte mineral, pardo fuerte 7.5YR4/6 (h) y 7.5YR5/6 (s), franco, estructura migajosa mediana; no adherente, no plástico; friable (h) y ligeramente duro (s); abundantes poros medianos a finos; abundantes raices finas a gruesas; límite neto con frecuentes piedras escasamente alteradas.
2Bw	70-120	Horizonte mineral, pardo fuerte 7.5YR5/6 (h) y amarillo-rojizo 7.5YR7/6 (s); textura franco-arcillo-arenosa; estructura en bloques angulares finos a medianos; no adherente, no plástico; firme (h) y duro (s); frecuentes poros finos a medianos; escasas raices gruesas; límite gradual ondulado.
2CB	120-150	Horizonte mineral, pardo fuerte 7.5YR5/6 (h) y amarillo rojizo 7.5YR6/6 (s); franco-arenoso; estructura en bloques angulares en seco a masiva en húmedo, con zonas de saprolita; no plástico y no adherente; firme (h) y duro (s); poros finos a medianos, escasas raices gruesas; límite gradual ondulado.
2C	>150	Saprolita de color amarillo parduzco 10YR6/8 (h) con manchas rojo amarillento 5YR4/6 y negras 5YR3.5/1(s) horizontales y verticales; textura franco-arenosa, pocos poros muy finos y algunas fisuras; límite no determinado.

	pH_{H2O} (1:2.5)	pH_{KCl}	PH_{NaF} (2')	pH_{abras}	%C	%MO	%N	C/N	P_{Olsen} mg/kg	$\%H_2O$ (15at)
Ah	5.05	4.32	9.99	4.96	4.72	8.14	0.38	12.4	4.4	nd
Bw	4.84	4.31	9.60	4.85	1.20	2.07	0.05	-	-	nd
2Bw	4.90	4.21	8.97	4.84	0.43	0.74	0.04	-	-	31.6
2CB	5.07	4.11	8.64	5.12	0.19	-	0.03	-	-	24.0
2C	4.99	4.12	8.61	5.02	0.10	-	0.03	-	-	18.1
Roca a	-	-	-	8.07	-	-	-	-	-	-

Perfil nº 6.1 (Anfibolitas de San Clodio)

Análisis granulométrico

	%AG 2-.2mm	%AF 0.2-0.05	%LG 0.05-0.02	%LF 0.02-0.002	$\%Ac_T^m$ <0.002	$\%Ac_F$ <0.2µ	$\%Ac_T^c$ calculada ($\%H_20$:15at)	%Ac DH2O	Textura $(Ac^m)/(Ac^c)$	Mineralogía de la fraccion arcilla $Ac_{\%}$
Ah	16.1	43.1	4.5	14.6	21.8	16.2	-	-	fpa	Am,
Bw	14.8	31.1	10.3	17.6	21.2	19.3	-	-	f	(V), H_{26}, Gb_5, (I)
2Bw	15.3	37.7	15.9	11.1	20.1	10.6	79.0	<5	fpa/p	(V), H_{26}, Gb_{23}, (I)
2CB	11.5	39.2	18.9	22.5	8.0	5.3	60.0	<5	fa/p	(V), H, Gb, (I)
2C	16.2	42.7	5.2	27.1	8.8	nd	45.3	<5	fa/p	H, Gb

Complejo de cambio

	$AcNH_4$ ($cmol_c/kg$)					KCl ($cmol_c/kg$)		CEC $AcNH_4$			CECe		
	Ca	Mg	K	Na	S	Al	H^+	T ($cmol_c/kg$	V %	Al %	T cmol/Kg	V %	Al %
Ah	0.15	0.17	0.23	0.29	0.84	2.68	-	12.09	6.9	22.2	3.52	23.9	76.1
Bw	0.11	0.06	0.45	0.17	0.79	2.37	-	7.22	10.9	32.8	3.16	25.0	75.0
2Bw	0.13	0.19	0.34	0.23	0.89	2.62	0.18	6.82	13.0	38.4	3.51	25.4	74.6
2CB	0.12	0.19	0.08	0.38	0.77	3.84	0.10	5.07	15.2	75.7	4.61	16.7	83.3
2C	0.16	0.17	0.06	0.27	0.66	5.78	0.05	7.14	9.2	81.0	6.44	10.2	89.8

	Ca/Mg	$\%K_S$	$\%Na_{CEC}$	CEC/Ac ($cmol_c/kg$)		$CECe/Arcilla^c$ ($cmol_c/kg$)	Min.alterables (50-100µ)	(<2mm)	
				CECmedida en Arcilla	CEC/Ac^c			%Caol.	%Gib.
Ah	0.88	27.4	2.4	-	-	-	nd	nd	nd
Bw	1.83	57.0	2.4	34.1	-	-	Fpatos	15	1
2Bw	0.68	38.2	3.4	33.9	8.6	4.4	Fpatos	26	5
2CB	0.63	10.4	7.5	63.4	8.5	7.7	Fpatos		
2C	0.94	9.1	3.8	81.1	15.8	14.2	Fpatos		
Ra	-	-	-	-	-	-	Fpatos		

Extracciones selectivas

	Fe_{DC} (%)	Fe_{ox} (%)	Fe_p (%)	Al_{DC} (%)	Al_{ox} (%)	Al_p (%)	C_p (%)	Si_{ox} (%)	$Al_{ox}+1/2Fe_{ox}$	Al_p/Al_{ox}	Retención Fosfato (%)	Indice Melanico	DOEO
Ah	1.74	0.65	0.75	0.99	0.70	0.78	1.9	0.09	1.03	1.11	75	1.59	0.15
Bw	1.46	0.74	0.71	0.55	0.55	0.51	0.8	0.05	0.92	0.93	-	-	-
2Bw	1.40	0.34	0.17	0.24	0.23	0.15	<0.3	<0.02	0.40	0.65	-	-	-
2CB	0.72	0.17	0.05	0.16	0.16	0.07	<0.3	<0.02	0.25	0.44	-	-	-
2C	1.18	0.12	0.02	0.19	0.19	0.09	<0.3	<0.02	0.25	0.47	-	-	-

Análisis total (%) (suelo seco al aire)

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	RTB $(Ca+Mg+K+Na)_T$ ($cmol_c/kg$)
Ah	47.14	12.95	6.50	2.31	1.07	1.01	1.19	184.3
Bw	38.57	17.76	8.65	1.96	1.62	1.51	1.20	204.9
2Bw	38.57	22.67	14.19	2.69	2.08	1.87	1.56	269.5
2CB	40.71	22.67	12.82	1.82	1.70	1.72	1.33	210.4
2C	53.57	18.32	9.03	1.61	1.58	2.90	0.92	195.6
Ra	43.00	15.20	11.70	18.70	7.00	2.70	1.7	1200.0

Modificadores: **L a e K_1 Ca_1 Ca_2 Mg_1 P**

FAO(1990).
FAO(1998).
SOIL TAXONOMY (1999).

Perfil nº 6.2 (Estación de Mera)

INFORMACION ACERCA DEL SITIO DE LA MUESTRA

Ubicación: Proximidades de la Estación de Mera (Ortigueira). E588996, N4835493
Altitud: 90 m
Posición fisiográfica: Ladera
Forma del terreno circundandante: Fuertemente ondulado. Pendientes máximas 16-30%
Pendiente: Clase 4
Uso del suelo: Forestal arbolado
Régimen de humedad: údico
Régimen de temperatura: mésico
Fecha de observación: 20 de mayo, 2001

INFORMACION ACERCA DEL SUELO

Material original:	Rocas metabásicas de facies anfibolita
Drenaje:	Clase 4. Bien drenado
Condiciones de humedad del suelo:	Capacidad de campo
Pedregosidad superficial:	Clase 0. Sin piedras.
Afloramientos rocosos:	Clase 0. Ninguna o muy poca rocosidad
Evidencias de erosión:	Inexistententes.
Influencia humana:	Repoblación forestal, talas.

Horizontes	**Prof. (cm)**	**Descripción**
Ah	0-37	Horizonte mineral rico en materia orgánica, pardo muy oscuro 7.5YR2.5/2 (h) y pardo oscuro 7.5YR3/3 (s); franco-arenoso; estructura migajosa fina; untuoso y ligeramente tixotrópico (h); hidrofóbico (s); porosidad muy abundante y de distintos tamaños con predominio de los bioporos; piedras de rocas escasamente alteradas; abundantes raices finas y gruesas; limite neto con línea de piedras.
Bw_1	37-78	Horizonte mineral, rojo amarillento 5YR5/8 (h) y pardo fuerte 7.5YR5/6 (s); franco-arenoso; estructura en bloques angulares finos a medianos; no adherente, no plástico, firme (h) y duro (s); frecuentes poros finos a medianos, escasas raices gruesas; pasa insensiblemente al horizonte inferior.
Bw_2	78-120	Horizonte mineral, pardo fuerte 7.5YR5/6 (h) y 7.5YR5/8 (s); franco-arenoso; estructura en bloques angulares en seco a masiva en húmedo; no plástico y no adherente; firme (h) y duro (s); poros finos a medianos; escasas raices gruesas; continua en profundidad.
Bw3	120-200	Horizonte mineral, pardo fuerte 7.5YR5/6 (h) y 7.5YR5/8 (s); franco-arenosa, estructura en bloques angulares; firme(h) y duro (s); pocos poros muy finos y algunas fisuras; límite gradual.
C	> 200	Saprolita de color amarillo parduzco 10YR6/8 (h) con manchas rojo amarillento 5YR4/6 y negras 5YR3.5/1(s) horizontales y verticales; franco-arenosa; pocos poros muy finos y algunas fisuras; límite no determinado.

Perfil nº 6.2 (Anfibolitas, E. de Mera)

DATOS ANALÍTICOS

	pHagua (1:2.5)	pH_{KCl}	pH_{NaF} (2')	pHabras	%C	%MO	%N	C/N	P_{Olsen} mg/kg	$\%H_2O$ (15at)
Ah	4.77	4.33	10.91	4.97	4.15	7.15	0.31	13.4	2.2	-
Bw1	4.71	4.29	9.52	5.00	0.94	1.62	0.03	-		25.8
Bw2	4.81	4.19	8.89	5.13	0.22	0.38	0.03	-		20.8
Bw3	4.70	4.10	8.93	4.82	0.23	0.38	0.02	-		21.9

Análisis granulométrico

	AG %	AF %	LG %	LF %	Ac_T %	Ac_F %	Ac_F/Ac_T	$\%Ac_T^c$ calculada ($\%H_20$:15at)	%Ac DH_2O	Tex $(Ac^m)/Ac^c)$	Mineralogía fraccion arcilla $Ac_{\%}$	otras características (l. delgada)
Ah	20.4	46.3	8.5	10.6	14.1	12,7	0.90	nd	<5	fa	-	-
Bw1	15.8	45.1	6.8	13.2	19.1	16.6	0.86	64.5	<5	fa/p	V, K_{29}, Gb_8	<1%cutanes de Ac
Bw2	19.7	48.0	7.2	8.6	16.5	9,5	-	52.0	<5	fa/p	K_{35}, Gb_9	
Bw3	22.0	39.6	6.7	14.5	17.2	nd	-	54.8	<5	fa/p	K_{29}, Gb_4	

	$AcNH_4$ ($cmol_c/kg$)					KCl ($cmol_c/kg$)	CEC $AcNH_4$			CECe		
	Ca	Mg	K	Na	S	Al	T ($cmol_c/kg$)	V %	Al %	T cmol/Kg	V	Al
Ah	0.09	0.08	0.12	0.22	0.51	2.33	11.70	4.4	19.9	2.84	18.0	82.0
Bw1	0.11	0.13	0.25	0.23	0.72	2.38	5.26	13.7	45.2	3.10	23.2	76.8
Bw2	0.16	0.18	0.22	0.19	0.75	2.33	4.29	0.2	54.3	3.08	24.3	75.6
Bw3	0.09	0.20	0.19	0.25	0.73	3.44	2.50	29.2	100	3.43	21.3	78.7

	Ca/Mg	$\%K_S$	$CEC/Arcilla^m$ ($cmol_c/kg$)		$CECe/Arcilla^c$ ($cmol_c/kg$)	Min.alterables (50-100µ)	% K Gb (<2mm)	
			CECmedida en Arcilla	CEC/Ac^c			K	Gb
Ah	1.12	23.5	-	-	-	-	-	-
Bw1	0.85	34.7	24.2	8.15	4.81	Fpatos	16	1
Bw2	0.89	29.3	12.5	8.25	5.92	Fpatos	14	1
Bw3	0.45	26.0	9.4	4.56	6.26	Fpatos	17	1

Extracciones selectivas

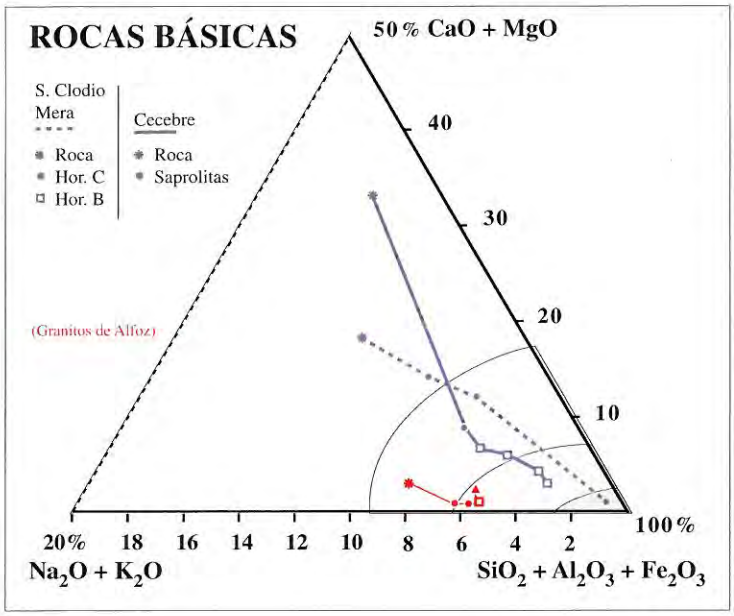
	Fe_{DC} (%)	Fe_{ox} (%)	Fe_p (%)	Al_{DC} (%)	Al_{ox} (%)	Al_p (%)	C_p (%)	Si_{ox} (%)	$Al_{ox}+1/2Fe_{ox}$	Al_p/Al_{ox}	Retención Fosfato (%)	Indice Melánico	DOEO
Ah	0.78	0.49	0.59	0.65	0.70	0.81	1.8	0.074	0.95	1.16	72	1.58	0.16
Bw1	0.90	0.46	0.38	0.31	0.35	0.30	<0.3	<	0.58	0.86	-	-	-
Bw2	0.78	0.19	0.08	0.17	0.13	0.08	<0.3	<	0.23	0.62	-	-	-
Bw3	1.46	0.29	0.12	0.25	0.18	0.10	<0.3	<	0.33	0.56	-	-	-

Análisis total (%) (suelo seco al aire)

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	RTB $(Ca+Mg+K+Na)_T$ ($cmol_c/kg$)
Ah	59.73	14.04	6.32	1.83	0.69	0.48	1.42	150.7
Bw1	53.57	17.57	7.25	1.62	1.05	0.71	1.43	163.9
Bw2	56.43	17.19	6.65	1.40	1.13	0.67	1.35	156.9
Bw3	66.43	18.81	7.20	1.53	0.80	0.97	1.43	150.3

Modificadores: **L a e (K_1) Ca_1 Ca_2 Mg_1 P (i)**

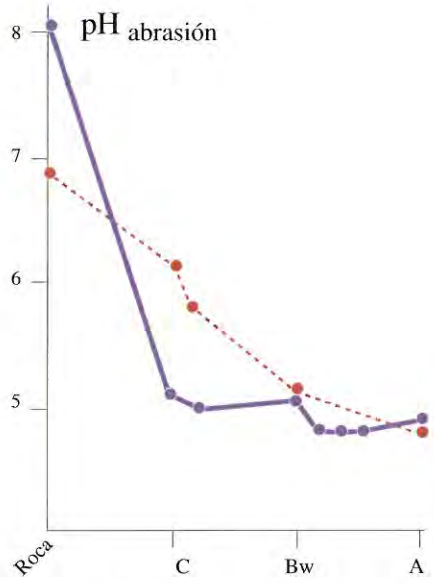
FAO(1990).
FAO(1998).
SOIL TAXONOMY (1999).

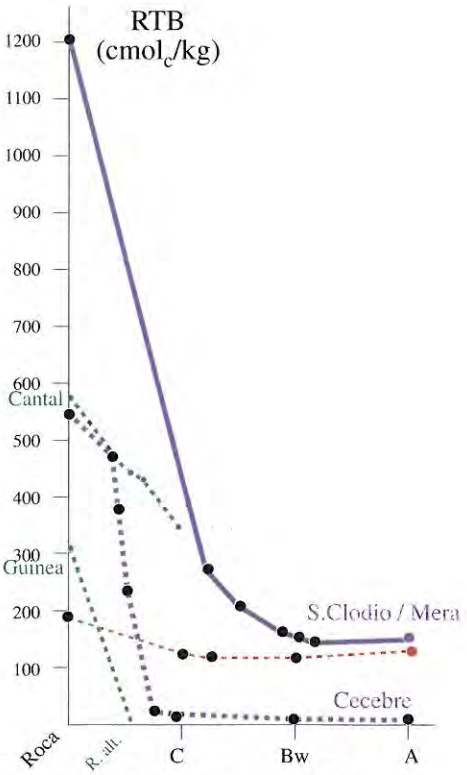


Evolución geoquímica e intensidad de la alteración (diagrama de Chesworth,1973)

Templados

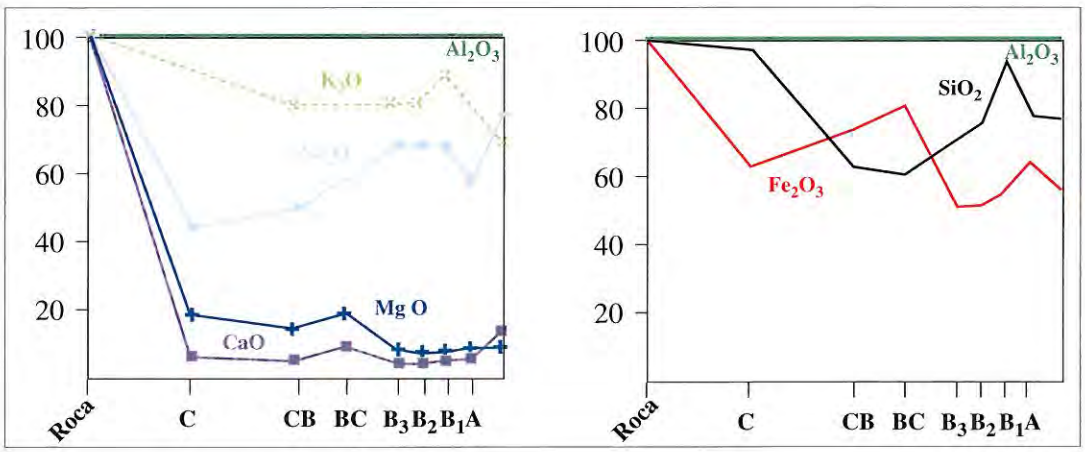
Tropicales y ecuatoriales





(P. Granitos Alfoz)

pH de abrasión y Reserva Total de Bases en los perfiles de alteración (en comparación con los obtenidos en rocas básicas del Cantal-Francia y Guinea).



Balances geoquímicos (iso-Al2O3)(S. Clodio/Mera)

Perfil nº 7 (Anfibolitas E. de Mera)

INFORMACION ACERCA DEL SITIO DE LA MUESTRA

Ubicación: Próximo a Estación de Mera. E588996, N4835393
Altitud: 90 m
Posición fisiográfica: Ladera
Forma del terreno circundandante: Ondulado. Pendientes máximas 8-16%
Pendiente: Clase 3:
Uso del suelo: Forestal arbolado
Régimen de humedad: údico
Régimen de temperatura: mésico
Fecha de observación: 20 de mayo, 2001

INFORMACION ACERCA DEL SUELO

Material original:	Rocas metabásicas de facies anfibolita
Drenaje:	Clase 4. Bien drenado
Condiciones de humedad del suelo:	Capacidad de campo
Pedregosidad superficial:	Clase 0. Sin piedras.
Afloramientos rocosos:	Clase 0. Ninguna o muy poca rocosidad
Evidencias de erosión:	Inexistententes.
Influencia humana:	Repoblación forestal, incendios, talas.

Horizontes	**Prof. (cm)**	**Descripción**
Ah_1	0-20	Horizonte mineral rico en materia orgánica, pardo muy oscuro 7.5YR2.5/2 (h) y pardo oscuro 7.5YR3/3 (s); franco-arenoso; estructura migajosa fina; untuoso y ligeramente tixotrópico (h); hidrófobo (s); porosidad muy abundante y de distintos tamaños con predominio de los bioporos; raices finas y gruesas; límite difuso .
Ah_2	20-50	Horizonte mineral, pardo muy oscuro 7.5YR2.5/2 (h) y pardo 7.5YR4/2 (s); franco-arenoso; estructura migajosa fina; untuoso y tixotrópico (h); hidrofóbico (s); no adherente, no plástico; poros finos a medianos muy abundantes; escasas raices gruesas, límite gradual ondulado.
Ah_3	50-120	Horizonte mineral, pardo oscuro 7.5YR3/4 (h) y pardo 7.5YR4/4 (s); franco-arcillo-arenoso; estructura migajosa mediana; no plástico y no adherente; friable (h) y duro (s); poros finos a medianos; escasas raices gruesas; límite difuso.
Bw	120-150	Horizonte mineral, rojo amarillento 5YR5/8 (h) y pardo fuerte 7.5YR4/6 (s); franco-arcillo-arenosa; estructura en bloques angulares finos a medianos, en seco, a masiva en húmedo; no plástico y no adherente; firme (h) y duro (s); pocos poros muy finos y algunas fisuras escasas raices gruesas; límite no determinado.

Perfil nº 7 (Anfibolitas E.Mera)

DATOS ANALÍTICOS

	pHagua (1:2.5)	pH_{KCl}	pH_{NaF} (2')	%C	%MO	%N	C/N	P_{Olsen} mg/kg	?.a. g/cc	$\%H_2O$ (15at)
Ah_1	4.90	4.42	10.74	8.18	14.10	0.54	15.1	2.4	0.81	20.5
Ah_2	4.85	4.25	10.39	5.82	10.03	0.48	12.1	5.4	-	22.2
Ah_3	4.70	4.31	9.97	3.21	5.53	0.11	-	2.6	-	-
Bw	4.71	4.39	9.63	1.91	3.29	0.06	-	-	-	-

Análisis granulométrico

	%AG 2-0.2mm	%AF 0.2-0.05	%LG 0.05-0.02	%LF 0.02-0.002	$\%Ac_T$ <0.002	Textura	Mineralogía de la fraccion arcilla $Ac_{\%}$	otras características (L.delgada)
Ah_1	21.4	32.2	11.0	17.8	16.8	fa	H_{18} (Am),	
Ah_2	23.3	38.2	6.1	15.0	17.5	fa	H_{16} (Am),	
Ah_3	24.0	36.4	6.2	9.2	24.0	fpa	H_{24} (Am),	<1%cutanes Ac
Bw	20.5	41.9	6.9	9.2	21.5	fpa	K_{28}	<1%cutanes Ac

Complejo de cambio

	$AcNH_4$ ($cmol_c/kg$)					KCl ($cmol_c/kg$)	CEC $AcNH_4$			CECe		
	Ca	Mg	K	Na	S	Al	T ($cmol_c/kg$)	V %	Al %	T $cmol_c/kg$	V %	Al %
Ah_1	0.11	0.12	0.28	0.26	0.77	2.47	13.65	5.6	18.1	3.24	23.8	76.2
Ah_2	0.12	0.09	0.26	0.23	0.70	4.01	13.65	5.1	29.4	4.71	14.9	85.1
Ah_3	0.08	0.04	0.15	0.21	0.48	3.12	6.24	7.7	50	3.60	13.3	86.7
Bw	0.09	0.04	0.12	0.23	0.48	2.44	6.45	7.4	37.8	2.92	16.4	83.6

	Ca/Mg	$\%K_S$	$\%Na_{CEC}$	CEC/Arcilla ($cmol_c/kg$)	CECe/Arcilla ($cmol_c/kg$)
Ah_1	0.9	36.4	1.9	81.3	19.3
Ah_2	1.3	37.1	1.7	78.0	26.9
Ah_3	2.0	31.3	3.4	25.9	14.9
Bw	2.3	25.0	3.6	30.0	13.6

Extracciones selectivas

	Fe_{DC} (%)	Fe_{ox} (%)	Fe_p (%)	Al_{DC} (%)	Al_{ox} (%)	Al_p (%)	C_p (%)	Si_{ox} (%)	$Al_{ox}+1/2Fe_{ox}$	Al_p/Al_{ox}	Retención Fosfato	Indice Melánico	DOEO
Ah_1	0.77	0.68	0.50	0.96	0.90	0.72	1.6	0.14	1.24	0.80	83	1.7	0.18
Ah_2	2.26	0.69	0.78	0.87	0.65	0.87	2.7	0.05	1.00	1.33	76	1.7	0.16
Ah_3	1.27	0.77	0.87	0.78	0.60	0.78	1.7	0.05	0.99	1.30	-	-	0.11
Bw	1.05	0.66	0.75	0.63	0.55	0.63	1.8	0.08	0.88	1.15	-	-	0.08

%	Fe_{La} ($\%_{Fep}$)	Fe_{Cu-La} ($\%_{Fep}$)	Fe_{p-Cu} ($\%_{Fep}$)	Al_{La} ($\%_{Alp}$)	Al_{Cu-La} ($\%_{Alp}$)	Al_{p-Cu} ($\%_{Alp}$)	C_p/Al_p+Fe_p (M)
Ah_1	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.50 (100)	0.045 (6)	0.192 (24)	0.483 (70)	4.7
Ah_2	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.78 (100)	0.033 (4)	0.183 (21)	0.654 (75)	1.8

Especiación del carbono orgánico

	C-b		C-s		C-p		C-o		C-n.o.	
	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$
Ah_1	0.07	0.9	0.03	0.4	2.14	26.2	3.3	40.5	2.6	32.0
Ah_2	0.22	3.8	0.17	2.9	1.21	20.8	3.4	58.4	0.8	14.1

Modificadores: **L a e Ca_1 Mg_1 P x_2**
FAO(1990).
FAO(1998).
SOIL TAXONOMY (1999).

Perfil nº 8 (Granulitas, Capelada)

INFORMACION ACERCA DEL SITIO DE LA MUESTRA

Ubicación: Mirador de Penedo Edroso en el camino de acceso al Curro de la Capelada.
E580932, N4836960 (Hoja 1 MTN)
Altitud: 400m
Posición fisiográfica: Ladera
Forma del terreno circundandante: Colinado. Pendientes máximas 16-30%
Pendiente: Clase 2
Uso del suelo: Forestal arbolado. *Pinus pinaster*
Régimen de humedad: údico
Régimen de temperatura: mésico
Fecha de observación: 20 de mayo, 2001

INFORMACION ACERCA DEL SUELO

Material original:	Rocas metabásicas de facies granulita
Drenaje:	Clase 4. Bien drenado
Condiciones de humedad del suelo:	Capacidad de campo
Pedregosidad:	Clase 1. Moderadamente pedregoso.
Afloramientos rocosos:	Clase 1. Moderadamente rocoso
Evidencias de erosión:	Inexistententes.
Influencia humana:	Repoblación forestal, talas, pastoreo.

Horizontes	**Prof. (cm)**	**Descripción**
Ah	0-44	Horizonte mineral rico en materia orgánica, negro 7.5YR2.5/1 (h) y pardo muy oscuro 7.5YR2.5/2 (s); franco-arenoso; estructura migajosa fina, untuoso y tixotrópico en húmedo, suelto e hidrofóbico en seco; porosidad muy abundante con predominio de los bioporos; pedregoso; raices finas y gruesas muy abundantes; limite neto y ondulado.
R	>44	Material original ligeramente alterado.

Perfil nº 8 (Granulitas, Capelada)

DATOS ANALÍTICOS

	pHagua (1:2.5)	pH_{KCl}	pH_{NaF} (2')	pH_{abras}	%C	%MO	%N	C/N	P_{Olsen} mg/kg	?.a. g/cc	$\%H_2O$ (15 at)
Ah	4.59	4.13	11.3	4.59	11.5	19.83	0.81	14.2	6.2	0.82	30.3
Roca				8.35							

Análisis granulométrico

	%ArG 2-0.2mm	%ArF 0.2-0.05	%LG 0.05-0.02	%LF 0.02-0.002	$\%Ac_T$ <0.002	Textura	Mineralogía de la fraccion arcilla
Ah	20.7	51.2	11.8	11.4	4.9	fa	Am

Complejo de cambio

	$AcNH_4$ ($cmol_c/Kg$)					KCl ($cmol_c/Kg$)		CEC $AcNH_4$				CECe			
	Ca	Mg	K	Na	S	Al	H^+	T $cmol_c/kg$	V %	Al %	H %	T $cmol_c/kg$	V %	Al %	H %
Ah	0.18	0.19	0.11	0.32	0.80	9.75	5.08	31.20	2.6	31.2	16.3	15.63	5.1	62.4	32.5

	Ca/Mg	$\%K_S$	$\%Na_{CEC}$
Ah	0.95	13.8	1.02

Extracciones selectivas

	Fe_{DC} (%)	Fe_{ox} (%)	Fe_p (%)	Al_{DC} (%)	Al_{ox} (%)	Al_p (%)	C_p (%)	Si_{ox} (%)	$Al_{ox}+1/2Fe_{ox}$	Al_p/Al_{ox}	Retención Fosfato (%)	Indice Melánico	DOEO
Ah	1.52	1.04	0.93	1.58	1.55	1.56	6.77	-	2.07	1.01	95	1.65	1.07

%	Fe_{La} ($\%_{Fep}$)	Fe_{Cu-La} ($\%_{Fep}$)	Fe_{p-Cu} ($\%_{Fep}$)	Al_{La} ($\%_{Alp}$)	Al_{Cu-La} ($\%_{Alp}$)	Al_{p-Cu} ($\%_{Alp}$)	C_p/Al_p+Fe_p (M)
Ah_1	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.93 (100)	0.138 (8.8)	0.541 (34.7)	0.881 (56.5)	7.5

Especiación del carbono orgánico

	C-b		C-s		C-p		C-o		C-n.o.	
	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$
Ah_1	0.39	3.4	0.48	4.2	5.9	51.5	0.00	0.0	4.69	40.9

Análisis total (%) (suelo seco al aire)

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	RTB $(Ca+Mg+K+Na)_T$ ($cmol_c/kg$)
Ah	40.71	12.09	8.25	5.12	1.75	0.29	1.11	309.1
Roca	54.49	16.29	9.04	14.00	5.00	0.63	2.00	909.1

Modificadores: **L R d a x_1 K_1 Ca_1 Mg_1 E A**

FAO(1990).
FAO(1998).
SOIL TAXONOMY (1999).

SUELOS HIDROMORFOS

Perfil nº 9 (Sedimentos cuaternarios, Capelada)

INFORMACION ACERCA DEL SITIO DE LA MUESTRA

Ubicación: Sierra de la Capelada. Cuenca de nacimiento del río do Curro. E583504, N4836001.
Altitud: 430m
Posición fisiográfica: Depresión
Forma del terreno circundandante: Ondulado. Pendientes máximas 2-8%
Pendiente: Clase 2
Uso del suelo: Pastizal hidromorfo.
Vegetación: Brezal hidromorfo de ericáceas con Mirica, Juncus, Sphagnum y Drosera.
Régimen de humedad: údico
Régimen de temperatura: mésico
Fecha de observación: 22 de mayo, 2001

INFORMACION ACERCA DEL SUELO

Material original:	Sedimentos de alteración de granulitas y eclogitas
Drenaje:	Clase 1. Escasamente drenado
Condiciones de humedad del suelo:	Perfil húmedo en su totalidad
Profundidad de la capa freática:	10 cm
Pedregosidad:	Clase 0. Sin piedras.
Afloramientos rocosos:	Clase 0. Sin afloramientos rocosos
Presencia de sales:	No hay
Influencia humana:	Pastoreo, drenaje.

Horizontes	**Prof. (cm)**	**Descripción**
H	0-11	Horizonte orgánico, pardo muy oscuro 7.5YR3/2(h) y pardo grisáceo oscuro 10YR4/2, con abundantes fibras de color pardo-rojizo oscuro 5Yr3/4 (h); franco-arcilloso; estrucura masiva; ligeramente adherente y moderadamente plástico; friable (h) y blando (s); abundantes porosidad fina; moderadamente pedregoso con mayor abundancia en el límite del horizonte; abundantes raices finas; limite gradual e irregular.
Ag	11-22	Horizonte mineral, negro 5Y2.5/1 (h) en profundidad, pasa a gris oliváceo y pardo grisáceo oscuro 10YR4/3.(s); franco-arenoso; estructura masiva; no adherente, no plástico; firme (h) y duro (s); muy pedregoso y con algunos nódulos duros; pocos poros medianos a finos; escasas raices finas, límite neto y plano.
Bg	22-50	Horizonte mineral, con matriz de color amarillo oliváceo con moteados gris oliva claros y amarillo oliva 2.5 Y6/8 (h); franco-arenoso; masivo; aherente y moderadamente plástico; muy pocos poroso; límite gradul irregular.
Cr	>50	Horizonte mineral, con matriz de color oliva 5Y5/4 (h); franco-arenoso; adherente y plástico; firme (h) y muy duro (s); límite no definido.

Perfil nº 9 (Sedimentos cuaternarios, Capelada)

DATOS ANALÍTICOS

	pHagua (1:2.5)	pH_{KCl}	pH_{NaF} (2')	%C	%MO	%N	C/N	P_{Olsen} mg/kg
H	5.08	4.46	7.94	17.24	29.7	1.21	14.2	13.0
Ag	5.15	4.26	8.85	6.80	11.7	0.49	13.9	4.6
Bg	5.95	4.89	8.32	0.48	0.8	0.07	6.9	
Cr	6.50	4.80	8.39	0.23	0.4	0.08	2.9	

Análisis granulométrico

	%ArG 2-0.2mm	%ArF 0.2-0.05	%LG 0.05-0.02	%LF 0.02-0.002	$\%Ac_T$ <0.002	Textura	Mineralogía de la fraccion arcilla
H	12.6	18.7	8.8	32.3	27.6	fp	-
Ag	19.6	27.2	6.1	42.6	4.5	fa	V, H, Q
Bg	26.6	34.6	10.0	14.3	14.5	fa	V, H, E Q
Cr	31.8	37.7	10.6	12.9	7.0	fa	H, E Q

Complejo de cambio

	$AcNH_4$ ($cmol_c/kg$)					KCl ($cmol_c/kg$)	CEC $AcNH_4$			CECe		
	Ca	Mg	K	Na	S	Al	T ($cmol_c/kg$)	V %	Al %	T cmol/Kg	V %	Al
H	4.90	4.17	1.05	0.89	11.01	0.41	24.18	45.5	1.7	22.43	96.4	3.6
Ag	1.75	1.58	0.24	0.36	3.93	1.26	9.75	40.3	12.9	5.19	75.7	24.3
Bg	2.05	1.92	0.04	0.41	4.42	0.00	3.12	100	-	4.42	100	-
Cr	2.45	2.42	0.08	0.39	5.34	0.00	3.90	100	-	5.34	100	

	Ca/Mg	$\%K_S$	$\%Na_{CEC}$	CEC/Ac ($cmol_c/kg$)	CECe/Ac ($cmol_c/kg$)
H	1.2	9.5	3.7	-	-
Ag	1.1	1.6	3.7	-	-
Bg	1.1	0.9	13.1	21.5	30.5
Cr	1.0	1.5	10.0	55.7	76.3

Extracciones selectivas

	Fe_{DC} (%)	Fe_{ox} (%)	Fe_p (%)	Al_{DC} (%)	Al_{ox} (%)	Al_p (%)	C_p (%)	Si_{ox} (%)	$Al_{ox}+1/2Fe_{ox}$	Al_p/Al_{ox}	Retención Fosfato %	Indice Melánico	DOEO
H	1.71	1.70	0.71	0.57	0.54	0.49	2.6	0.04	1.39	0.90	56	1.53	0.23
Ag	1.60	1.18	0.06	0.56	0.52	0.30	3.8	<0.02	1.11	0.58	15	1.51	-
Bg	4.65	0.21	0.17	0.63	0.10	0.06	<0.3	<0.02	0.21	0.60	-	-	-
Cr	1.88	0.70	0.05	0.20	0.20	0.03	<0.3	0.08	0.55	0.15	-	-	-

%	Fe_{La} ($\%_{Fep}$)	Fe_{Cu-La} ($\%_{Fep}$)	Fe_{p-Cu} ($\%_{Fep}$)	Al_{La} ($\%_{Alp}$)	Al_{Cu-La} ($\%_{Alp}$)	Al_{p-Cu} ($\%_{Alp}$)	C_p/Al_p+Fe_p (M)
H	0.00 (0.0)	0.06 (8)	0.70 (92)	0.079 (16.1)	0.159 (32.4)	0.253 (51.5)	7.0
Ag	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.06 (100)	0.067 (22.3)	0.113 (37.7)	0.120 (40.0)	26.4

Especiación del carbono orgánico

	C-b		C-s		C-p		C-o		C-n.o.	
	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$
H	0.14	0.8	0.03	0.2	2.43	14.1	11.92	69.2	2.71	15.7

Modificadores: **L g (P) I M**
FAO(1990).
FAO(1998).
SOIL TAXONOMY (1999).

SUELOS SOBRE ROCAS ULTRABÁSICAS SERPENTINIZADAS

Perfil nº 10 (Serpentinitas, Capelada)

INFORMACION ACERCA DEL SITIO DE LA MUESTRA

Ubicación: Macizo de Herbeira. Sierra de la Capelada.. E585722, N4840206
Altitud: 420m
Posición fisiográfica: Ladera
Forma del terreno circundandante: Colinado. Pendientes máximas 16-30%
Pendiente: Clase 3
Uso del suelo: Pastoreo.
Régimen de humedad: údico
Régimen de temperatura: mésico
Fecha de observación: 22 de mayo, 2001

INFORMACION ACERCA DEL SUELO

Material original:	Serpentinitas
Drenaje:	Clase 4. Bien drenado
Condiciones de humedad del suelo:	Capacidad de campo
Pedregosidad:	Clase 3. Muy pedregoso.
Afloramientos rocosos:	Clase 4. Extremadamente rocoso
Evidencias de erosión:	Muy Severa
Influencia humana:	Quema y pastoreo

Horizontes	**Prof. (cm)**	**Descripción**
Ah	0-25	Horizonte mineral rico en materia orgánica, negro 7.5R2/.51 (h) y pardo grisáceo muy oscuro 10YR3/2 (s); franco-arenoso, estructura migajosa mediana, no adherente, no plástico, friable (h) y blando (s), porosidad muy abundante y de distintos tamaños con predominio de los bioporos, raices finas y gruesas muy abundantes, limite gradual e irregular.
Bw	25-50	Horizonte mineral, pardo fuerte 7.5YR4/6 (h) y .pardo amarillento 10YR5/4 (s), franco-arcilloso, estructura en bloques subangulares muy finos en seco y con tendencia a masiva en húmedo, no adherente, no plástico, firme (h) y duro (s), abundantes poros finos, bioporos y raíces finas y medias; límite gradual ondulado y a profundidad variable.
C	> 50	Horizonte mineral, pardo oliva claro 2.5Y4/4 (h); franco-arenoso; estructura de saprolita; ligeramente adherente y plástico, firme (h) y duro en seco; muy pocos poros fisurales y biporos; límite neto a profundidad muy variable
R		Serpentinita con alteración incipiente

DATOS ANALITICOS

		pHagua (1:2.5)	pH_{KCl}	pH_{NaF} (2')	%C	%MO	%N	C/N	P_{Olsen} mg/kg
P1	A	5.33	4.33	8.20	6.58	11.34	0.44	14.95	2.6
	Bw	6.32	5.24	8.21	0.56	0.97	<0.10	-	-
	C	6.64	5.12	8.15	0.17	0.29	<0.10	-	-
P2	Bg	6.49	5.38	8.51	0.63	1.09	<0.10	-	-

Análisis granulométrico

		%ArG 2-0.2mm	%ArF 0.2-0.05	%LG 0.05-0.02	%LF 0.02-0.002	$\%Ac_T$ <0.002	Ac_F/Ac_T	Text.	Mineralogía de la fracción arcilla
P1	A	21.6	19.4	17.9	29.9	18.3		f	(E),Go, S, Cl
	Bw	12.3	32.6	17.8	20.3	17.1		f	Cl-E, Go, S, Cl
	C	6.3	54.1	22.1	8.4	9.1		fa	Cl-E, Go, S, Cl
P2	Bg	2.8	26.6	21.3	19.5	29.9		fp	E S, (Cl)

Perfil nº 10 (Serpentinitas, Capelada)

Complejo de cambio

		$AcNH_4$ ($cmol_c/Kg$)					KCl ($cmol_c/Kg$)	CEC $AcNH_4$			CECe		
		Ca	Mg	K	Na	S	Al	T $cmol_c/Kg$	V %	Al %	T $cmol_c/Kg$	V %	Al %
P1	A	1.55	5.17	0.04	0.26	7.02	1.25	14.20	49.4	8.8	8.27	84.9	15.1
	Bw	1.10	11.75	0.13	0.25	13.23	0.00	13.65	97	0	13.23	100	-
	C	1.40	13.33	0.18	0.27	15.18	0.05	12.09	100	0	15.23	99.7	0.3
P2	Bg	1.25	14.33	0.15	0.34	16.07	0.00	13.20	100	0	16.07	100	0

		Ca/Mg	$\%K_S$	$\%Na_{CEC}$	CEC/Ac) ($cmol_c/kg$)	CECe/Ac ($cmol_c/kg$)
P1	A	0.30	0.57	1.83	77.6	45.2
	Bw	0.09	0,98	1.87	79.8	77.4
	C	0.11	1.2	2.2	132.9	167.4
P2	Bg	0.09	0.93	2.58	44.15	53.7
R						

Extracciones selectivas

		Fe_{DC} (%)	Fe_{ox} (%)	Fe_p (%)	Al_{DC} (%)	Al_{ox} (%)	Al_p (%)	C_p (%)	Si_{ox} (%)	$Al_{ox}+1/2Fe_{ox}$	Retención Fosfato (%)	Indice Melánico	DOEO
P1	A	6.03	2.20	0.66	0.58	0.32	0.30	1.8	-	1.42	68.5	1.70	0.34
	Bw	4.29	1.00	0.07	0.30	0.16	0.03	<0.3	-	0.66	-	-	
	C	0.62	0.15	0.02	0.13	0.10	0.02	<0.3	-	0.18	-	-	
P3	Bg	3.92	0.85	0.07	0.32	0.21	0.03	<0.3	-	0.64	-	-	

%	Fe_{La} ($\%_{Fep}$)	Fe_{Cu-La} ($\%_{Fep}$)	Fe_{p-Cu} ($\%_{Fep}$)	Al_{La} ($\%_{Alp}$)	Al_{Cu-La} ($\%_{Alp}$)	Al_{p-Cu} ($\%_{Alp}$)	C_p/Al_p+Fe_p (M)
A	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.66 (100)	0.058 (19.3)	0.096 (32)	0.148 (49.7)	6.5

Especiación del carbono orgánico

	C-b		C-s		C-p		C-o		C-n.o.	
	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$	%	$\%C_T$
A	0.13	2.0	0.07	1.1	1.59	24.3	4.75	72.6	0.00	0.0

Análisis total (%) (Suelo seco al aire)

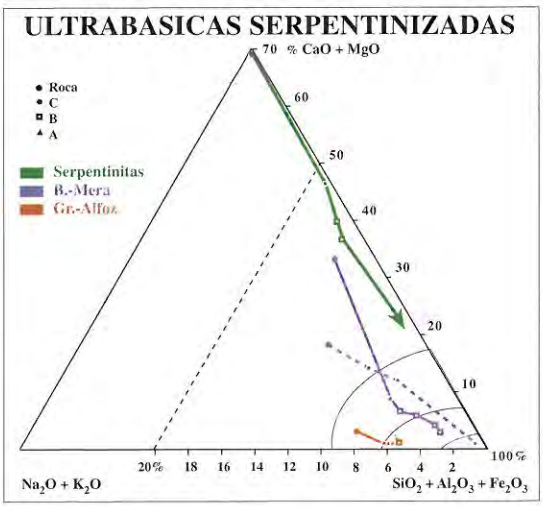
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	RTB $(Ca+Mg+K+Na)_T$ ($cmol_c/kg$)
P1	A	36.43	9.45	19.66	5.87	10.50	0.29	0.42	750.9
	Bw	30.00	10.58	22.68	7.35	15.17	0.36	0.53	1041.4
	C	40.40	7.04	16.53	7.65	23.30	0.12	0.61	1998.9
P3	Bg	27.86	7.56	25.73	5.61	14.84	0.19	0.36	955.8
R									2242.0

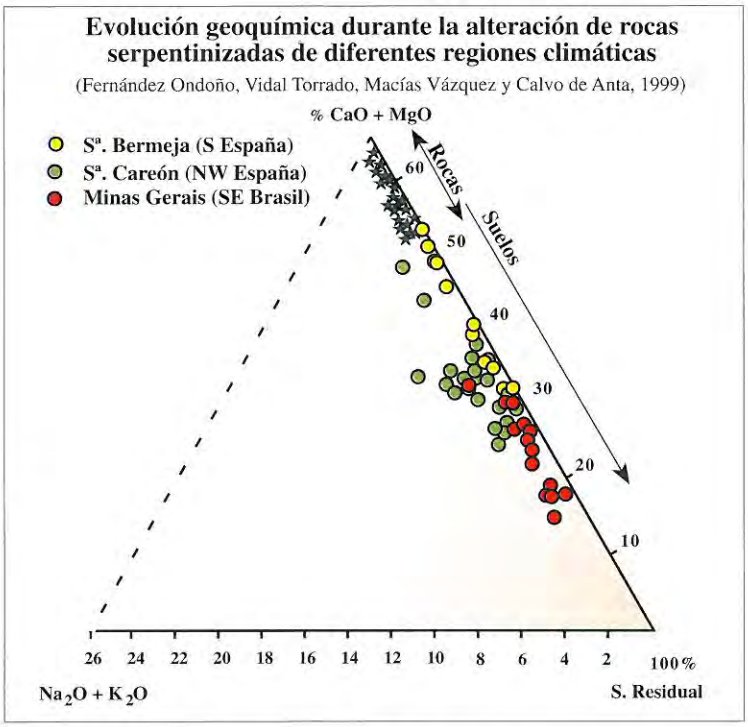
Modificadores: **L R d K_1 Ca_2 P E A ***

FAO(1990).

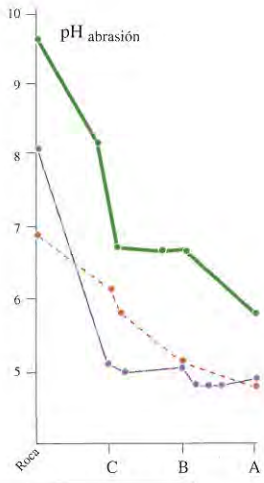
FAO(1998).

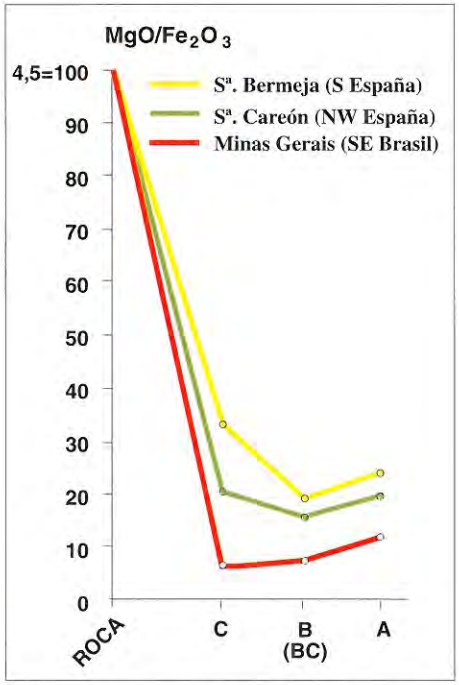
SOIL TAXONOMY (1999).



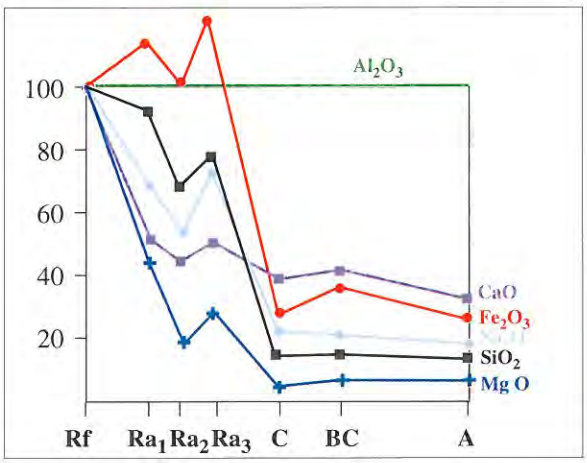


Reserva Total de Bases y pH de abrasión.





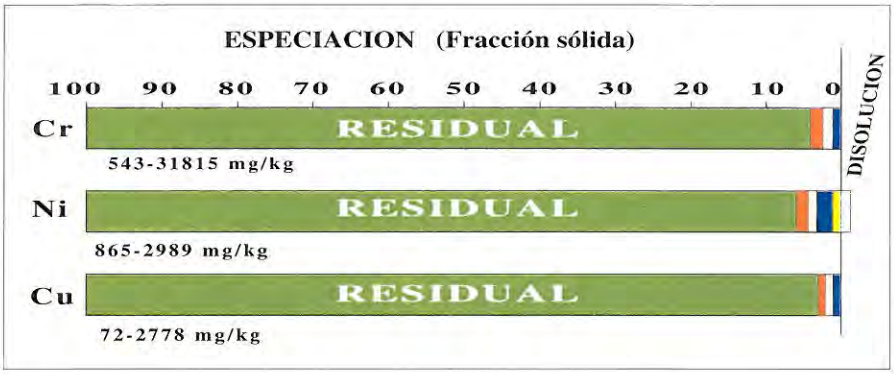
Variación de la relación MgO/Fe_2O_3 en rocas y suelos.



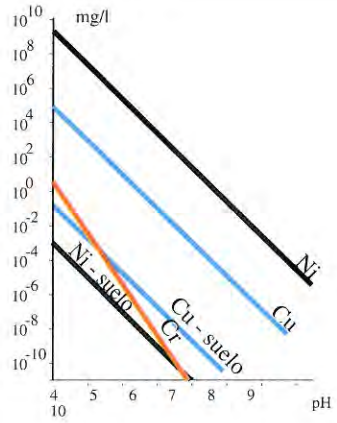
Balances geoquímicos (iso-Al2O3)(S. Careón)

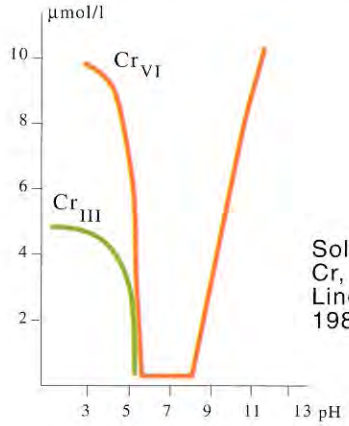
	CONTENIDO MEDIO DE METALES PESADOS EN SUELOS DE GALICIA (mg/kg)						Holanda			R.D. (1990)
	Granitos	Pizarras	Esquistos	Anfibolitas	Gabros	Serpentinitas	A	B	C	pH<7
Cu	12	23	26	35	39	541 (2778)	50	100	500	
Zn	44	37	58	61	83	-	200	500	3000	150
Ni	27	30	40	60	55	1988 (2989)	50	100	500	30
Pb	52	53	45	40	30	-	50	150	600	50
Cr	25	51	55	121	135	6196 (31815)	100	250	800	100
Co	30	29	35	43	58	-	20	50	300	
Mn	155	197	535	725	1083	2408	-	-	-	

Metales pesados en suelos de Galicia (Macías, Veiga y Calvo de Anta (A: VROM, 1991. Cu:15+0.6(L+H) Zn:50+1.5(2L+H) Ni:10+L+H Pb: 50+L+H Cr:50+2L)

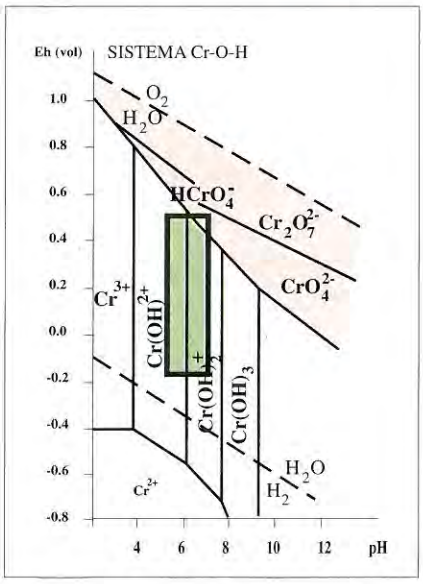


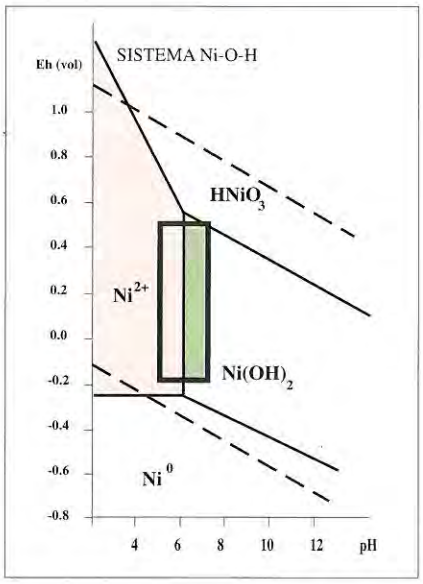
Especiación de metales pesados en suelos sobre serpentinitas de la Sierra del Careón (Calvo de Anta, Alvarez Rodríguez y López Mosquera, 1987).



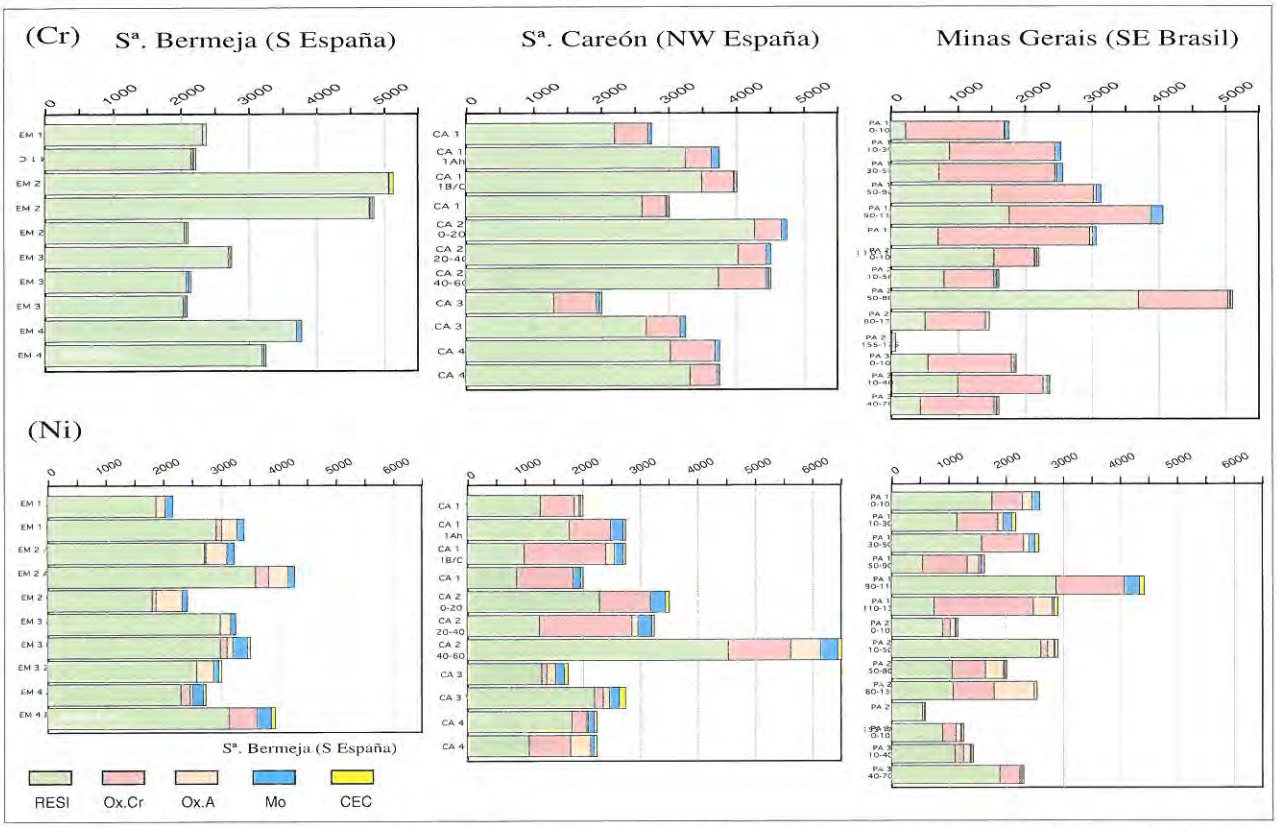


Solubilidad de hidróxidos de Cr, Ni y Cu (Brooks, 1987; Lindsay, 1979; Sadif y Enfield, 1984).

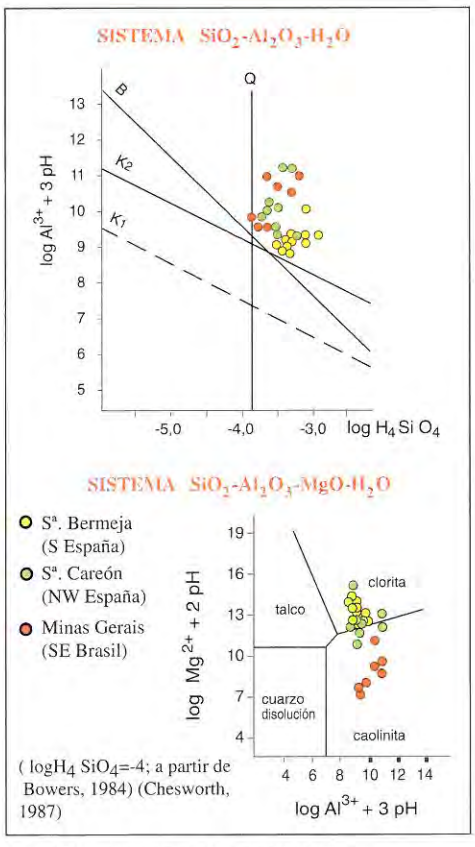




Campos de estabilidad Eh-pH de Cr y Ni (Brookins, 1988)



Especiación de Cr y Ni en suelos de diferentes regiones climáticas (extracciones selectivas)(mg/kg)(Fernández Ondoño, Vidal Torrado, Macías Vázquez y Calvo de Anta, 1999)



Diagramas de equilibrio (extractos de saturación)

	Sierra Bermeja S España	Sierra del Careón NW España	Minas Gerais. SE Brasil
CLIMA P (mm)	1022	1627	1513
Tª (C)	16.8	11.4	19.9
R. hídrico	XERICO	UDICO	UDICO-USTICO
R. temper.	TERMICO	MESICO	ISOTERMICO
TIPOS DE SUELOS	L. eutrico/móllico Ph. háplico C. eutrico	L. móllico Ph. háplico C. húmico/crómico	L. eutrico/móllico Ph. háplico C.húmico/crómico
pH (H_2O)			
B/C	7.0 7.3	6.3 6.5	6.4 6.7
% ARCILLA			
B/C	23 35	22 18	28 43
MINERALOGIA			
M. herenc.	Cl, T, Cr,	Cl, Cr, T,	Cl, T, Cr,
M. trans.	-	Cl-V, V	Cl-V, V
M. neof.	E, Go	(E), K, Go	K, Go
	Cl: clorita; Cr: crisotilo; T: talco; Cl-V: intergrados clorita-vermiculita, V: vermiculita; E: esmectitas; K: Caolinita; Go: Goethita		
COMPOSICION			
%SiO_2	32-45	12-36	12-19
%MgO_2	8-18	3-17	1-4
%Al_2O_3	4-7	6-13	7-11
MECANISMOS DE ALTERACION			
pérdida máx. Mg	disolución	disolución	disolución
pérdida máx. Si	hidrólisis	hidrólisis	hidrólisis
Fe /Fe DCB T	88%	96%	98%
	63%	90%	86%
	12%	55%	58%
PROCESOS GEOQUIMICOS	ferbisialitización	fermonosialitización	fermonosialitización
PROCESOS EDAFICOS	alteración	alteración	alteración (iluviación)

Evolución edafogeoquímica comparada de rocas serpentinizadas en tres condiciones climáticas

SUELOS SOBRE SEDIMENTOS CUATERNARIOS DE MARISMA

Perfil nº 11 (Marisma de Ortigueira)

INFORMACION ACERCA DEL SITIO DE LA MUESTRA

Ubicación: Ensenada de Ladrido (Ría de Ortigueira), E593961, N4838687.
Altitud: Nivel del mar submergido en mareas vivas
Posición fisiográfica: Borde de canal en marisma alta
Forma del terreno circuandante: Llano a Casi llano. Pendientes máximas 2%
Pendiente: Nula
Uso del suelo: Espacio Natural, Marisqueo ocasional.
Régimen de humedad: ácuico
Régimen de temperatura: mésico
Fecha de observación: 22 de mayo, 2001

INFORMACION ACERCA DEL SUELO

Material original:	Sedimentos fluviales
Drenaje:	Impedido en profundidad.
Condiciones de humedad del suelo:	Húmedo en todo el perfil
Profundidad de la capa freática:	Submergido en la pleamar de mareas vivas
Pedregosidad:	Clase 0. Sin piedras.
Afloramientos rocosos:	Clase 0. Ninguno
Evidencias de erosión:	Erosión hídrica en los cauces fluviales
Presencia de sales:	Sales en superficie en los bordes de los cauces y en superficies sin vegetación.
Influencia humana:	Marisqueo, pastoreo muy ocasional, aprovechamiento de juncales.

Horizontes	**Prof. (cm)**	**Descripción**
Ag	0-12	Horizonte mineral, oliva 5Y4/3 con manchas rojo amarillentas en la superficie de raices y poros (h); franco-limoso, estructura de grano suelto, no adherente, no plástico, fluye fácilmente entre los dedos, prácticamente no maduro (n= 1.-1.4): suelto (s), frecuentes bioporos y raices, límite gradual plano.
Cr	> 12	Horizonte mineral, gris oscuro 5Y4/1 y con manchas negras Gley 2 2,5/5B(h); franco-limoso; sin estructura; fluye fácilmente entre los dedos; prácticamente no maduro (n entre 1 y 1.4), adherente y ligeramente plástico; raices carbonizadas y algunos huecos de poliquetos marinos.

Perfil nº 11 (Marisma de Ortigueira)

DATOS ANALITICOS

	pH_{H2O} (1:2.5)	pH_{H2O} (20dias)	pH_{KCl}	pH_{ox} (H_2O_2 30%) 10'	6h	pH_{NaF} (2')	%C	%MO	%N	C/N	%S	$\%CaCO_3$
Ag	6.48	6.23	6.47	4.41	3.40	8.08	5.11	8.80	0.46	11.1	0.32	5.96
Cr	7.63	7.55	7.57	5.50	6.37	8.80	2.76	4.76	-	-	1.60	7.28

Análisis granulométrico

	%ArG 2-0.2mm	%ArF 0.2-0.05	%LG 0.05-0.02	%LF 0.02-0.002	$\%Ac_T$ <0.002	Textura	P_{Olsen} mg/kg	Mineralogía de la fraccion arcilla
Ag	1.79	20.49	26.63	32.01	19.08	fl	25.2	V K (I) (Cl)
Cr	5.83	23.20	37.72	21.72	11.53	fl	-	V K (I) (Cl)

Complejo de cambio

	$AcNH_4$ ($cmol_c/kg$)					KCl ($cmol_c/kg$)	CEC $AcNH_4$		
	Ca	Mg	K	Na	S	Al	T ($cmol_c/kg$)	V %	Al %
Ag	20.6	21.7	3.54	7.39	53.23	0.00	15.0	100	-
Cr	21.5	18.2	3.60	10.42	53.72	0.00	14.0	100	-

	Ca/Mg	$\%K_S$	$\%Na_{CEC}$	CEC /Ac $AcNH_4$ ($cmol_c/kg$)
Ag	0.94	6.65	49.3	78.6
Cr	1.18	6.70	74.4	121.4

Extracciones selectivas

	Fe_{DC} (%)	Fe_{ox} (%)	Fe_p (%)	Al_{DC} (%)	Al_{ox} (%)	Al_p (%)	C_p (%)	Si_{ox} (%)	$Al_{ox}+1/2Fe_{ox}$	Retención Fosfato %	Indice Melánico	DOEO
Ag	0.79	0.55	0.11	0.14	0.14	0.05	0.48	0.06	0.42	22	1.58	0.04
Cr	0.36	0.36	0.08	0.11	0.11	-	-	0.05	0.29	79	1.46	0.04

Composición del agua intersticial

	pH	CE dS/cm	SO_4 $mmol_c/L$	Cl $mmol_c/L$	Na $mmol_c/L$	Ca $mmol_c/L$	Mg $mmol_c/L$	K $mmol_c/L$	Mg/Cl
Ag	7.4	5.4	19.2	38.5	28.7	12.2	16.6	1.2	0.43
Cr	7.4	12.3	18.1	50.1	36.1	13.2	13.9	3.9	0.97

Relaciones iónicas	Na/Cl	SO_4/Cl	Mg/Cl	Ca/Cl	K/Cl
Ag	0.74	0.50	0.43	0.32	0.03
Cr	0.72	0.36	0.28	0.26	0.08
Agua de mar (Colin, 1987)	0.86	0.30	0.20	0.04	0.02

Modificadores. **L g s n (c) E I**
FAO(1990).
FAO(1998).
SOIL TAXONOMY (1999):

SUELOS DE LAS DE MARISMAS DE LA RIA DE ORTIGUEIRA

X.L. Otero y F. Macías

Introducción

Galicia es una de las Comunidades Autonómicas con mayor longitud de costa (~1700 km) y, desde el punto de vista geomorfológico, uno de los litorales más complejos de la Península Ibérica; donde las Rías son su característica más peculiar.

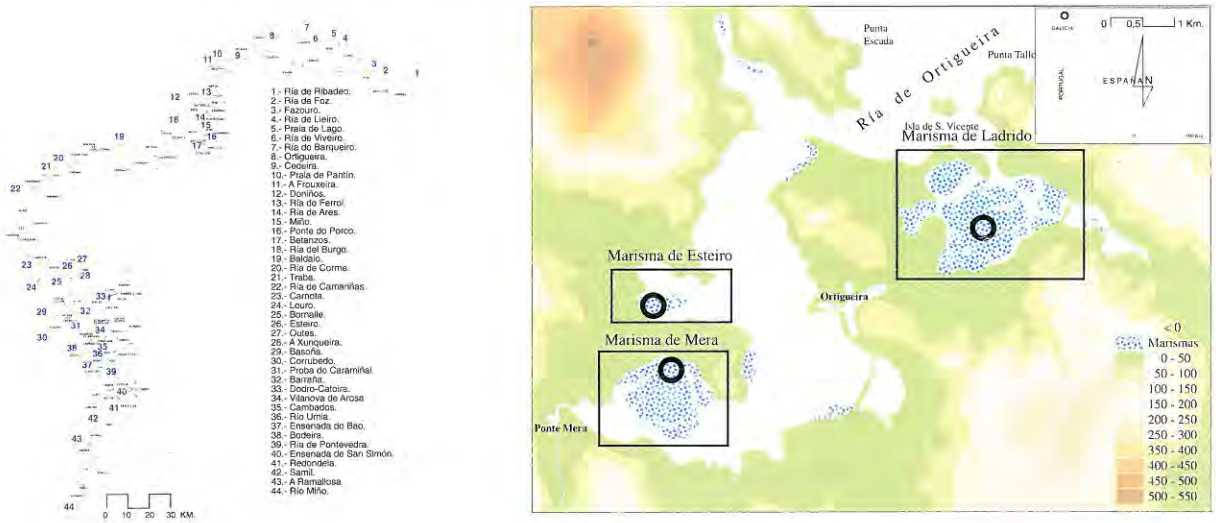


Figura 1.- Distribución de los principales sistemas marismeños litorales en Galicia. Localización de la Ría de Ortigueira y marisma de Ladrido.

En ellas se produce un importante proceso de sedimentación, con formación de zonas de marisma asociadas principalmente a los fondos de Ría, ensenadas y desembocaduras de los ríos (Fig.1). Algunos de estos espacios presentan un buen estado de conservación y sus valores naturales han sido reconocidos internacionalmente, sobre todo como zona de invernada de aves acuáticas. La flora y vegetación también presentan elementos de interés a nivel Comunitario. En concreto, en la ría de Ortigueira existen varias comunidades vegetales y hábitats de interés Comunitario (recogidos por la *Directiva Hábitats*) (p.ej. pastizales de *Spartina*; pastizales salinos atlánticos, vegetación anual de *Salicornia*, etc.; Fig.2), motivo que ha favorecido su inclusión dentro del Convenio Ramsar y en la Propuesta Gallega de Zonas a considerar para la Red Natura 2000.

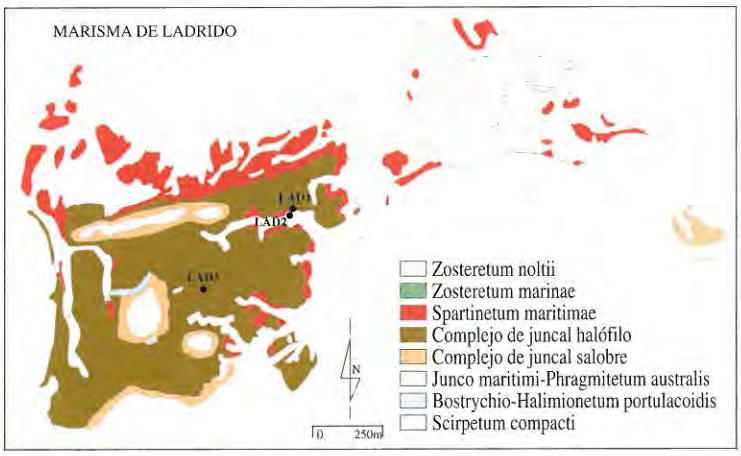
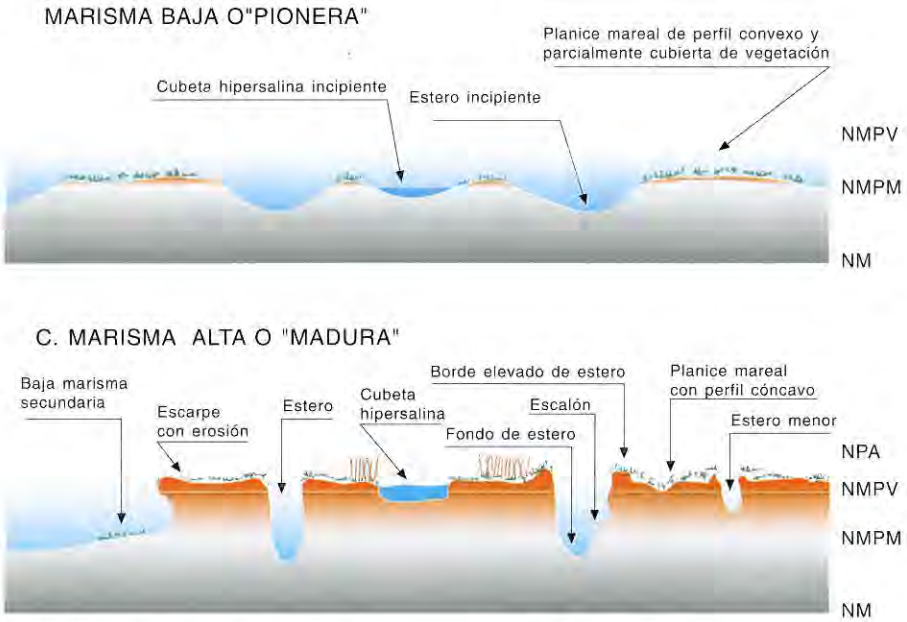


Figura 2.- Mapa de vegetación de la marisma de Ladrido (modificado de Sánchez, 1995).

Características generales Desde un punto de vista ecológico una marisma litoral representa un espacio de transición entre el medio terrestre y el acuático marino que se caracteriza por una variación gradual del efecto de inundación por el flujo mareal (Fig.3). En este sentido, la influencia de la marea es, desde el punto de vista geoquímico y edáfico, uno de los aspectos más importantes, ya que determina el grado de aireación del suelo y, por consiguiente, los procesos redox que pueden ocurrir en estos suelos. El mayor o menor periodo de inundación le confiere a estos suelos una amplia gama de condiciones biogeoquímicas. Los suelos de la marisma baja se encuentran inundados casi permanentemente por lo que corresponden con ambientes fuertemente reducidos, en algunos casos con olor a sulfuro, y escasamente colonizados por la vegetación. La principal especie vegetal vascular

capaz de colonizar estos ambientes es Spartina maritima. La marisma alta o madura ofrece una mayor diversidad de comunidades vegetales (Fig. 4), siendo el juncal halófilo (Limonio-Juncetun maritimae) la dominante. En estos ambientes, además del Eh, otros parámetros que muestran una gran variabilidad y por consiguiente a considerar en los estudios edafológicos son: el grado de madurez del suelo (Valor de n) que puede oscilar entre suelos totalmente inmaduros (n>2) de la marisma baja a suelos maduros y firmes (n>0.7) propios del juncal. La salinidad también ofrece una gran variabilidad tanto espacial como estacional, debido a que muchos de los factores que afectan a este parámetro también sufren cambios espaciales (aporte de aguas dulce) y estacionales (p.ej. ETP, precipitación). En este sentido los resultado obtenidos para la capa freática ponen de manifiesto variaciones en la conductividad eléctrica que van desde medios con una conductividad eléctrica inferior a 1 dS m^{-1} a más 35 dS m^{-1} (ver Tabla 1). Estos dos parámetros (Eh y salinidad) son las variables que tienen una mayor influencia en la distribución de las comunidades vegetales (Sánchez et al. 1998).



NPA: Nivel de las pleamares astronómicas
NMPV: Nivel medio pleamares vivas
NMPM: Nivel medio pleamares muertas
NM: nivel medio

Figura 3:-Sección transversal de la marisma baja y alta mostrando sus principales formas fisiográficas (modificado de Long & Mason, 1983).

La presencia de material sulfúrico (fundamentalmente pirita y formas de sulfuros metaestables como la mackinawita, FeS, o greigita, Fe_3S_4) también es de especial interés. Los procesos de sulfato-reducción bacteriana constituyen el principal mecanismo de oxidación de la materia orgánica en estos suelos, representando en algunos casos más del 80% de la respiración microbiana del suelo. El producto final de este proceso es la formación de la pirita cuya concentración, al igual que la de otros sulfuros metálicos, presenta variaciones espaciales y estacionales importantes (Tabla 1 y Figs. 4,5; Otero *et al.* 2000, 2001)

Tabla 1.-Localización y características generales de algunos perfiles representativos de los suelos de las marismas de la Ría de Ortigueira (Otero, 2000)

-Caracterísiticas generales del sitio-

Perfil	**Tipo marisma**	Posición fisiográfica	Comunidad vegetal	**Esp. vegetaldominante**
Perfil 1		**Borde de Marisma**	***Scirpetum maritimi-compacti***	***Scirpus maritimus***
Perfil 2	**Alta o**	**Depresión**	*Spartinetum maritimae*	*Spartina maritima*
Perfil 3	Madura	**Borde canal**	***Bostrychio-Halimionetum portucaloidis***	***Halimione portulacoides***
Perfil 4		**Planicie marisma**	*Limonio-Juncetum maritimae*	*Juncus maritimus*
Perfil 5		**Depresión**	*Spartinetum maritimae*	*Spartina maritima*
Perfil 6		**Cubeta**	**Sin vegetación**	-
Perfil 7	**Marisma Baja**	Planicie marisma	*Spartinetum maritimae*	*Spartina maritima*
Perfil 8	**Marisma alta**	**Fondo de canal**	**Sin vegetación**	-

Características fisico-quimicas.

Horiz	Prof. (cm)	pH campo	pH incub	pH oxidac	C org.	S total	Spirit.	Valor n	CE* dS cm^{-1}	Textura
					----------%	----------				
					PERFIL 1					
Hg	0-20	6.4	5.8	5.4	21.8	2.2	0.93	1.4-2	0.82	Arcillo-limosa
Cr	>20	6.4	3.2	2.5	11.3	2.8	0.90	1.4-2	3.25	Franco-arc.-limosa
					PERFIL 2					
Ag	0-10	6.6	4.7	5.6	7.4	0.5	0.23	1.4-2	29.9	Franco-arc.-limosa
ACg	10-15	6.4	3.6	2.9	9.2	2.4	1.65	1.4-2	-	Franco-arc.-limosa
Cr	>15	6.5	3.1	2.8	7.5	2.3	1.46	1.4-2	48.3	Franco-arc.-limosa
					PERFIL 3					
Ag	0-25	5.5	5.2	5.0	5.7	0.3	0.04	1.4-2	15.5	Franco-limosa
Cg	>25	6.8	5.8	2.6	3.6	0.5	0.04	1.4-2	6.20	Franco-limosa
					PERFIL 4					
Ag	0-17	5.8	5.6	5.0	9.8	0.3	0.01	0.4-0.7	19.8	Franco-arc.-limosa
2Cg	17-40	6.0	5.6	2.2	5.6	0.3	0.01	1.4-2	-	Franco-arc.-limosa
3Cr	>40	6.5	5.5	2.2	8.4	0.4	nd	1.4-2	-	Franco-arc.-limosa
					PERFIL 5					
Ag	0-10	6.3	6.5	5.4	5.3	0.5	0.10	1-1.4	34.6	Franco-arc.-limosa
2Cg	10-25	6.3	4.7	2.9	4.8	0.7	0.60	1.4-2	-	Franco-limosa
3Cg	>25	6.6	3.3	2.5	5.7	2.1	0.80	1.4-2	44.8	Franco-arc.-limosa
					PERFIL 6					
Ar	0-10	6.6	6.1	2.7	3.7	0.9	0.58	>2	54.1	Franco-arc.-limosa
Cg	10-25	6.7	6.3	4.7	1.4	0.1	0.04	1-1.4	12.3	Arcillosa
					PERFIL 7					
Ag	0-10	6.6	2.8	2.8	5.4	3.0	2.07	>2n	40.2	Franco-arc.-limosa
Cr	10-25	6.7	2.6	2.3	4.0	3.2	1.54	1-1.4	-	Franco-arc.-limosa
2Cr	>25	6.5	2.7	2.4	3.7	2.9	0.85	0.7-1	21.7	Franca
					PERFIL 8					
Ag	0-12	7.4	5.1	2.9	3.0	1.0	1.06	>2	26.10	Franco-arc.-limosa
Cr	>12	7.1	5.9	2.3	2.5	1.5	1.32	1-1.2	31.10	Franco-arc.-limosa

*CE, conductividad eléctrica del agua intersticial.

Tipos de suelos identificados en la Ría de Ortigueira

Perfil	Soil Taxonomy (1999)	FAO-UNESCO (1998)
1	Histic Sulfaquents	Fluvisol hístico-prototiónico
2	Typic Sulfaquents	Fluvisol epigleico-prototiónico
3	Sodic Hidraquents	Fluvisol endosódico-epigleyco
4	Typic Hidraquents	Fluvisol endosódico-epigleyco
5	Typic Sulfaquents	Fluvisol epigleyco-prototiónico
6	Sodic Hidraquents	Fluvisol estágnico-epigleico
7	Typic Sulfaquents	Fluvisol epigleyco-prototiónico
8	Sodic Hidraquents	Fluvisol endosódico-epigleico

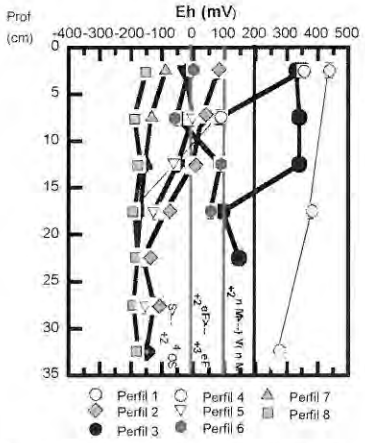


Figura 4.-Variciación espacial y con la profundidad de las condiciones redox en suelos de marisma.

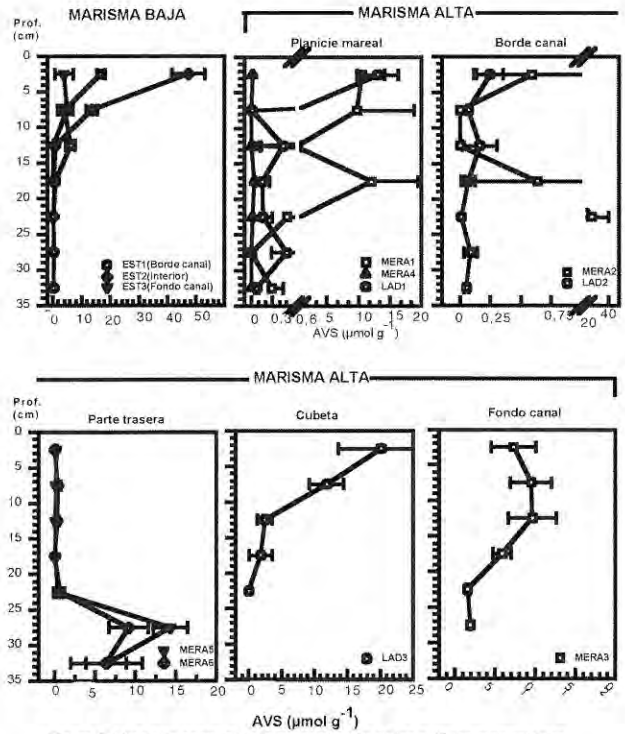


Figura 5.-Variación espacial de la concentración de los sulfuros metaestables (fracciónAVS) en los suelos de las marismas de la Ria Ortigueira.

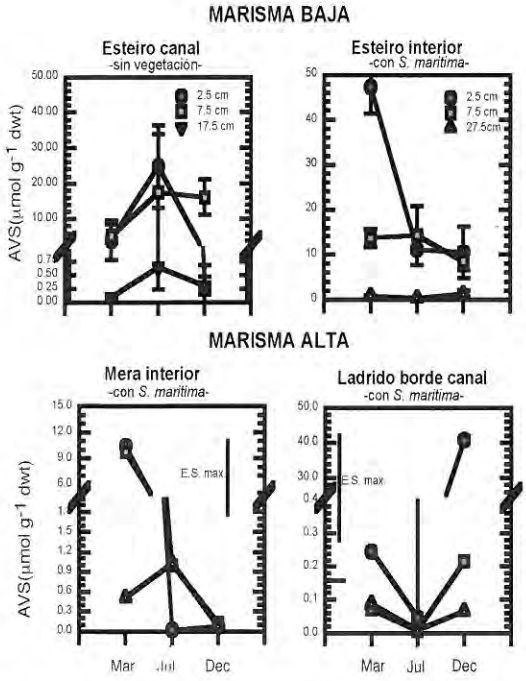
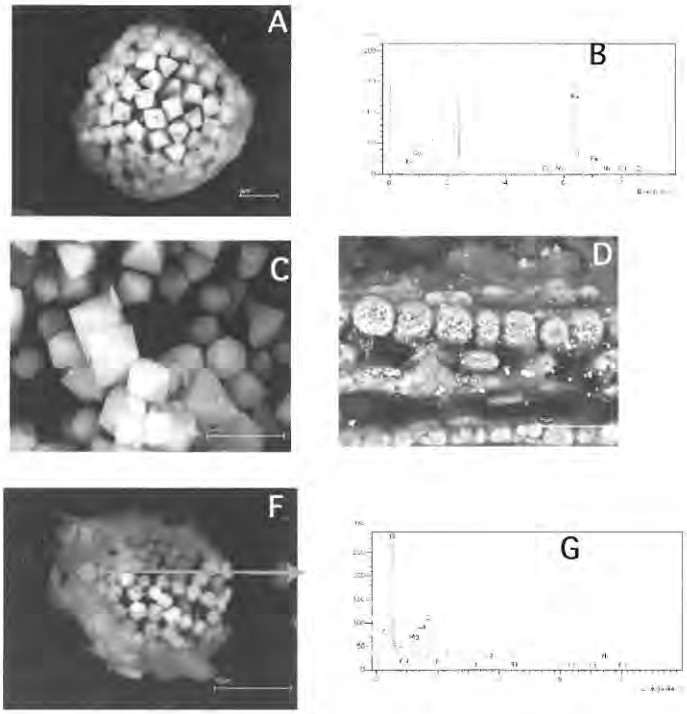


Figura 6.-Variación estacional de la fracción AVS. En suelos con vegetación las concentraciones más reducidas se presentan en verano debido al efecto oxidante de las plantas (p.ej ETP_i liberación de oxígeno por las raíces). Por el contrario en la marisma baja (suelos siempre anóxicos) los mayores valores



Fotografía 1.-Algunos ejemplos de formas de diferentes pirita identificadas al microscopio electrónico (SEM) en los suelos de la Ría de Ortigueira. A) Pirita framboidal. B) Analisis elemental (EDS).C) Cristales de piritas euhedrales octaédricos. D) Piritas framboidales en el interior de un tejido vegetal.F) Pirita framboidal con recubrimiento rico en silice. G)Análisis elemental.

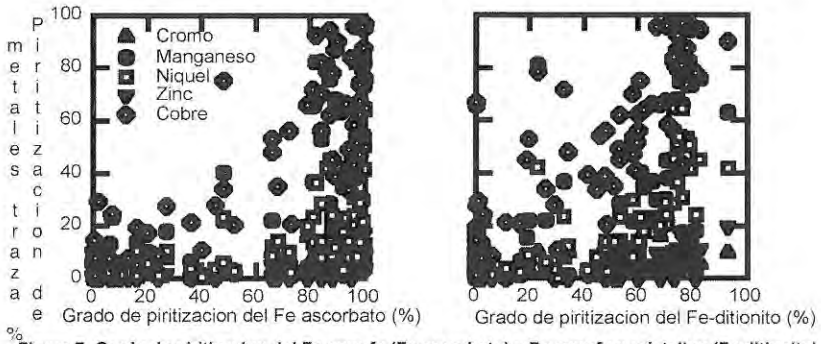


Figura 7.-Grado de piritizacion del Fe amorfo (Fe ascorbato) y Fe amorfo y cristalino (Fe ditionito) vs grado de piritización de meales traza. Los resultados muestras que el Cu presenta valores de incorporación a la fracción piritica similares o incluso superiores a los del Fe. El Niquel y el Mn presentan valores de piritización importantes pero más reducidos que el Fe, mientras que el Zn y Cr apenas se incorporan a esta fracción. Estos resultados ponen de manifiesto que la fracción piritica puede actuar como un importante sumidero de metales traza, pero su oxidación puede suponer la liberación de metales pesados al agua intersticial y ser asimilados por la biota.

ALGUNOS EJEMPLOS DE SUELOS CONTAMINADOS

MINA TOURO, MINERIA DE MATERIALES CON SULFUROS

(A. Pérez Otero y R.Calvo de Anta)

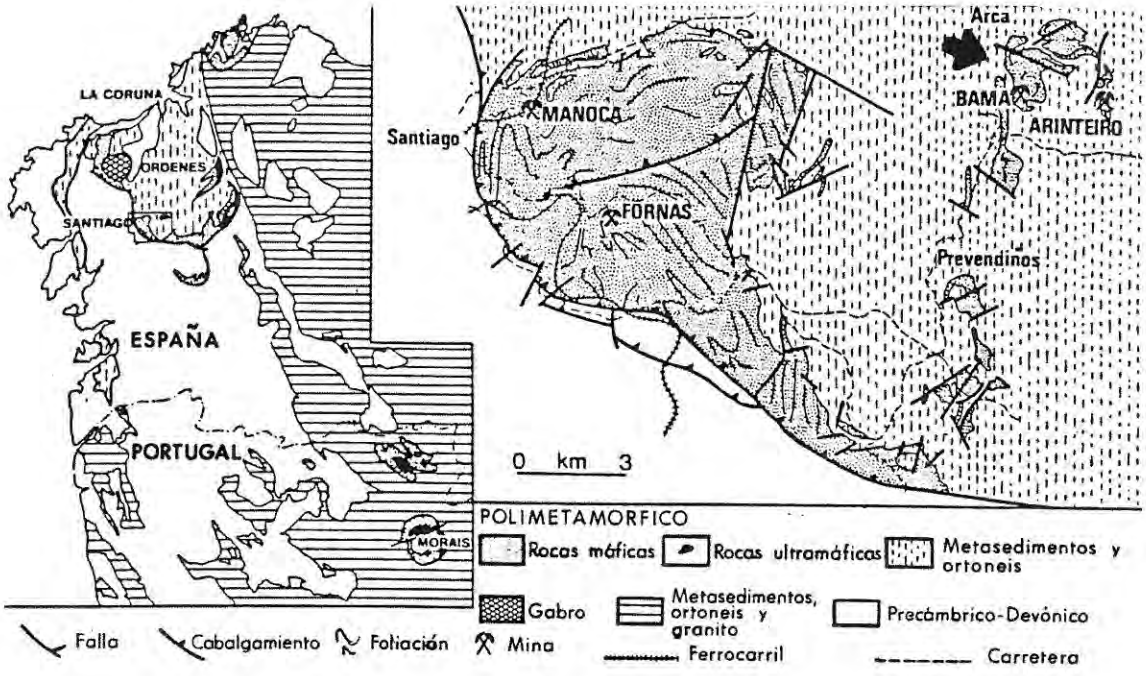
El grupo más importante de mineralizaciones de cobre existentes en Galicia está asociado al macizo básico de Santiago, de edad precámbrica, formado casi exclusivamente por rocas anfibólicas que localmente aparecen en facies granulita y retrógradas a esquistos verdes. El yacimiento de Arinteiro, en las proximidades de la localidad de Touro, presenta mineralizaciones masivas de pirita, pirrotina y calcopirita, incluidas en anfibolitas granatíferas. Explotado por Explosivos Río Tinto S.A., su cubicación se calcula en más de 25 millones de toneladas, con una ley de cobre que oscila alrededor de 0.63% (IGME,1982).

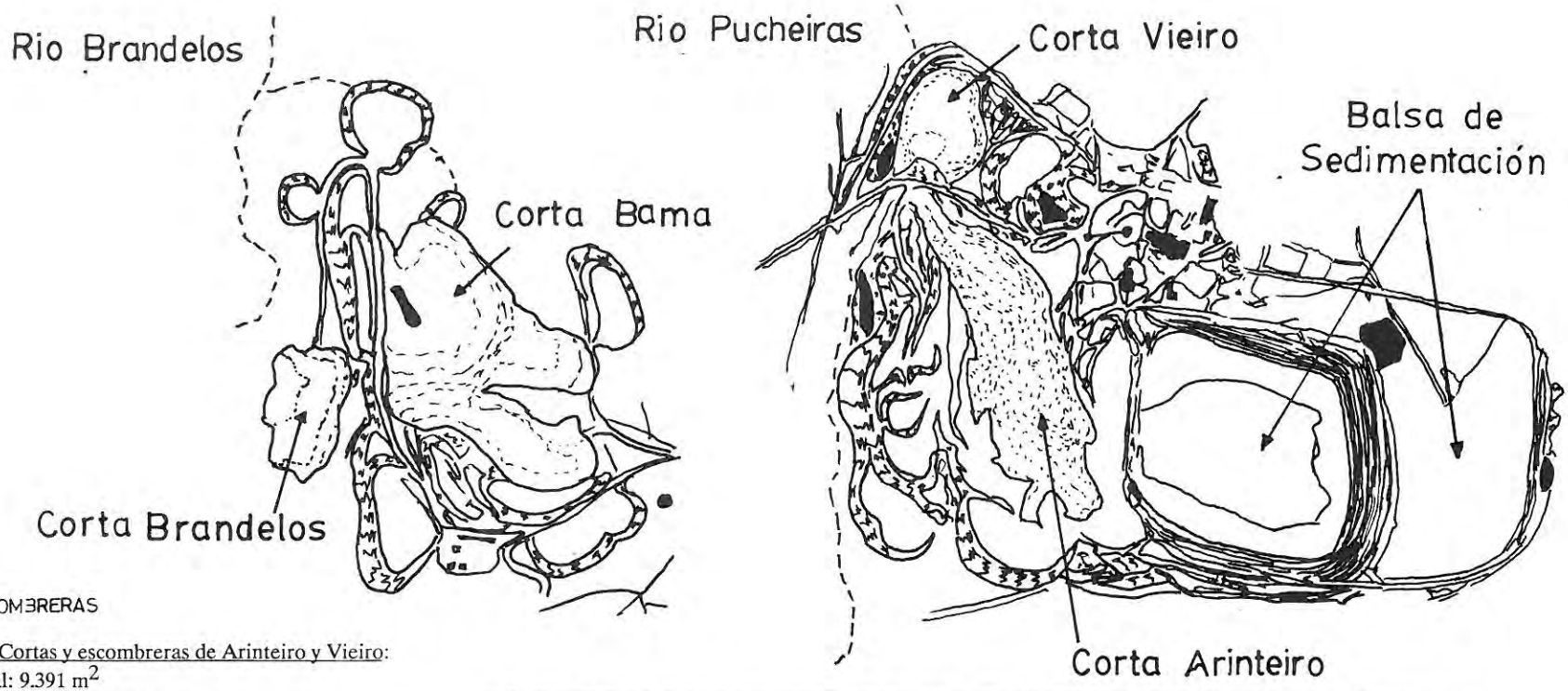
Como consecuencia de la explotación de la mina existe una amplia superficie cubierta por material de escombrera, zonas de corta, de labores y de infraestructura que quedan expuestas a la acción de aguas superficiales, permitiendo su oxidación por diversos mecanismos inorgánicos, actuando como oxidantes el oxígeno y el ion Fe3+, en los medios más ácidos, y con la intervención de bacterias catalizadoras del tipo de los Thiobacillus, y el transporte de los productos generados (sulfatos, ácido sulfúrico) hacia cauces fluviales y capas subsuperficiales, en una amplia zona de influencia. La riqueza en sulfuros de hierro, y de cobre y hierro, en la roca originaria y la exposición de una gran superficie de la misma en el material fragmentado acumulado en el talud, causa una rápida meteorización, con la consiguiente oxidación de los sulfuros y fuerte liberación de protones hacia los sistemas más inmediatos. Por otra parte, el elevado contenido de determinados metales pesados, no sólo cobre y hierro, sino otros tales como Ni, Mn, Cr, Pb, Zn... y el incremento teórico de solubilidad de dichos elementos con el descenso del pH, es probablemente causa de contaminación de las aguas y suelos bañados por ellas.

El presente trabajo ha sido realizado en 1988 y 1989 (Perez Otero, 1992: Tesis Doctoral). Desde esa fecha se han realizado análisis de seguimiento de las condiciones de suelos y aguas. Las condiciones actuales del medio afectado no han variado sustancialmente.

OBJETIVOS

1. Cartografía y propiedades de los suelos en las superficies de mina
2. Establecimiento de impactos sobre aguas fluviales de la cuenca del Ulla
3. Suelos afectados por aguas ácidas de mina
4. Calidad del agua de pozos y manantiales de la zona
5. Análisis de material vegetal
6. Evaluación de posibles impactos por transporte aéreo de partículas (muestreo y análisis de suelos en un entorno próximo a las minas, dentro de un radio de 15 Km)



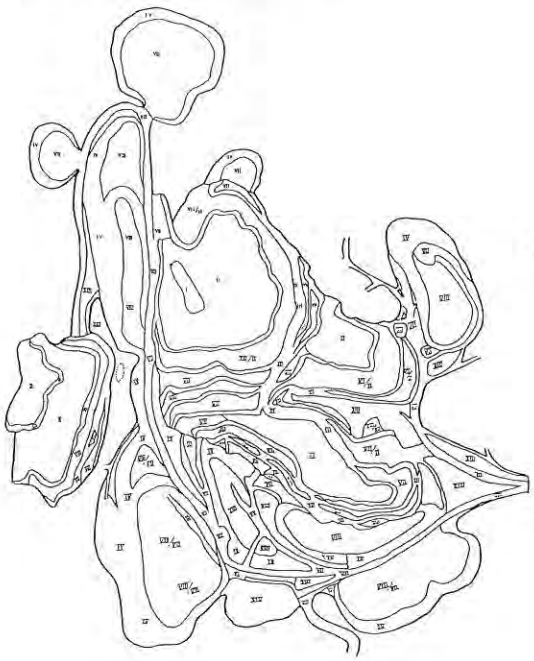


Explotación 1: Cortas y escombreras de Arinteiro y Vieiro:
Superficie Total: 9.391 m^2
Dimensión E-W (máxima): 2.150 m
Dimensión N-S (máxima): 1.550 m
Corta Vieiro: 243 m^2
Corta Arinteiro: 915 m^2
Escombreras: 2.109 m^2
Balsa de decantación de finos: 3.526 m^2
Lagunas y superficies encharcadas: 1.117 m^2

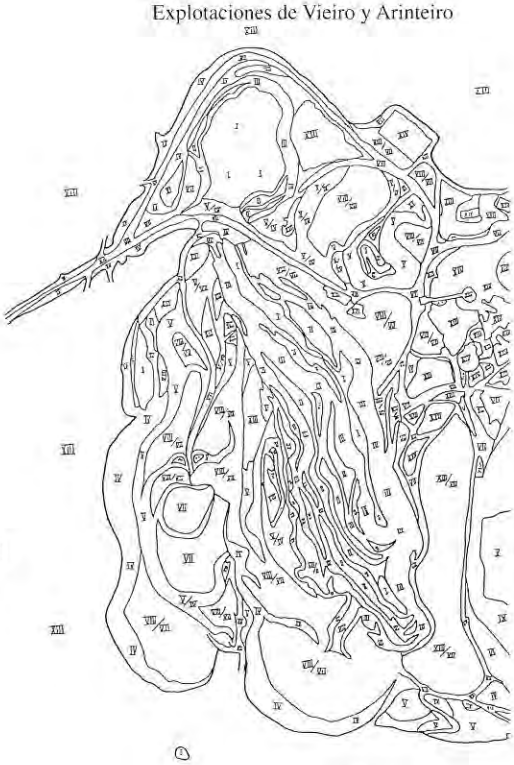
Explotación 2: Cortas y escombreras de Bama y Brandelos:
Superficie Total: 3.970 m^2
Dimensión E-W (máxima): 1.200 m
Dimensión N-S (máxima): 1.470 m
Corta Bama: 1.196 m^2
Corta Brandelos: 290 m^2
Escombreras: 1.398 m^2
Lagunas: 26 m^2

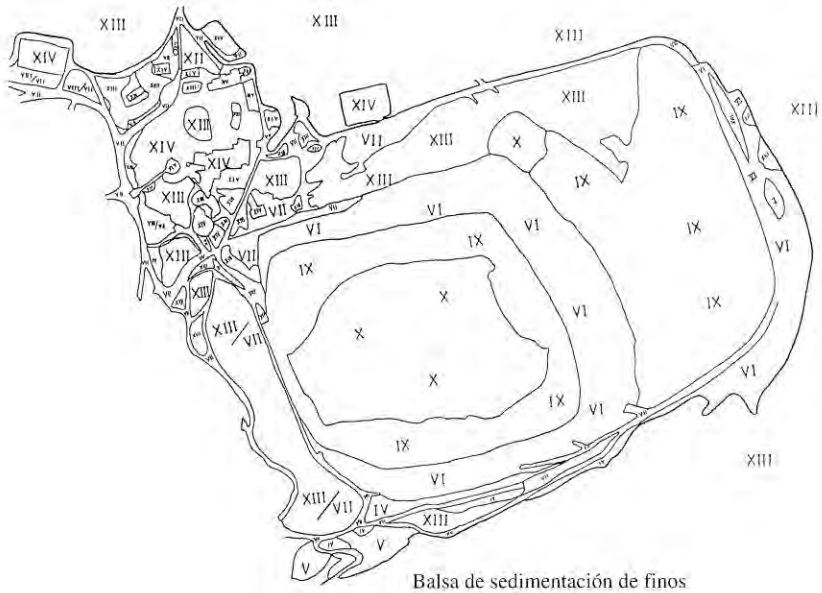
UNIDADES CARTOGRÁFICAS (1992)

Explotaciones de Bama y Brandelos



Explotaciones de Vieiro y Arinteiro





Balsa de sedimentación de finos

UNIDADES TAXONOMICAS

La utilización del Esquema FAO, en su versión de 1989, conduce a clasificar los suelos de estas zonas dentro de la Unidad ANTROSOL URBICO, dado que son suelos con una profunda modificación por actividades humanas, que presentan hasta una profundidad de más de 50 cm una acumulación de residuos procedentes de minas..

La utilización de la Soil Taxonomy conduce a clasificarlos de modo general dentro del Grupo UDORTHENTS (Soil Survey Staff, 1987).

La subdivisión en Subgrupos fue realizada siguiendo las propuestas de Fanning y Fanning (1989).

La subdivisión en Familias de estos Subgrupos se ha hecho de acuerdo a criterios de pendiente (para separar taludes de plataformas), o de pedregosidad (para separar escombreras de piedras de aquellas con piedras y finos) o de textura de la tierra fina (dentro de estas últimas), o de porosidad/compacidad del material que aflora.

DESCRIPCION DE UNIDADES

1.- HYDRAQUENT (Fondo de excavación con laguna).- Rodeadas de taludes de corta, aparecen representadas sobre todo en las vacies de Arinteiro y Vieiro, formando amplias lagunas fuertemente ácidas y con escasa vida acuática, a excepción de pequeñas cantidades de algas clorofíceas , del genero Hormidium. En los márgenes, sobre el basamento de lodos y superficies de piedras, con régimen de hidromorfía alternante, aparecen revestimientos arcillosos de colores blancos y rojo amarillentos. Se localizan en las cortas de Arinteriro, Vieiro y Bama.

2.- LITHIC SCALPIC UDORTHENT (Fondo de excavación abierto).- Su mejor representación se encuentra en las vacies de Bama y Brandelos, en el fondo de la gran excavación que ocupa la parte central de esta zona. Sólo en determinadas épocas del año, y ocupando las zonas más deprimidas, aparecen acumulaciones de agua sobre una base de sedimentos finos. En los márgenes y otras zonas afectadas de procesos de evaporación, es frecuente la presencia de precipitados blancos pulverulentos y también rojos, se citan apariciones esporádicas de filamentos de algas del genero *Hormidium*, y en las posiciones fisiográficas más bajas, aparecen en las pequeñas charcas varios individuos de *Typha latifolia*.

3.- LITHIC SCALPIC UDORTHENT, ESCARPADO (Taludes de excavación).- Se modelan directamente sobre la roca anfibolítica, formando escalones en un conjunto de pendiente superior al 50% . En ocasiones se aprecia el asentamiento de pequeñas manchas vegetales de especies de matorral, generalmente Ulex y Erica. La roca desnuda muestra, perfectamente reconocibles, áreas de oxidación, posiblemente con liberación de importantes cantidades de hidrogeniones, que dan propiedades de fuerte acidez a las aguas acumuladas en el fondo de la excavación).

4.- SPOLIC UDORTHENT, ESCARPADO, MUY PEDREGOSO (Taludes de escombrera con bloques y piedras).- Forman laderas de fuerte pendiente y elevada pedregosidad, constituida por bloques de más de 1 m de diámetro y piedras superiores a 10 cm de diámetro. Prácticamente en toda su extensión están desprovistos de revegetación, que solo esporádicamente, se instala en pequeñas manchas del terreno con dominio de finos. Estas superficies representan las áreas de mayor conflicto, tanto por la dificultad de su restauración como por la fuerte acidez que generan en las aguas de escorrentía, de muy fácil percolación a través de sus amplios poros

5.- SPOLIC UDORTHENT, ESCARPADO, PEDREGOSO (Talud de escombrera con piedras y finos) .-Alternan de modo caótico con las anteriores. La existencia de una fracción menor de 2 mm de diámetro, cubriendo materiales pedregosos y rellenando huecos entre ellos, hace disminuir las limitaciones fisicoquímicas, facilitando la colonización vegetal, que aparece en algunos puntos dispersos. Entre los géneros reconocidos figuran Salix, Halimium, Erica, Ulex, Silene, Agrostis, Corrigiola, Pteridium, Pinus, Sarothamnus,... .

6.- SPOLIC UDORTHENT, ESCARPADO, NO PEDREGOSO, MENOS ÁCIDO (Taludes de escombrera de Planta con ensayos de restauración). Se conforman según asociaciones escalonadas pista-talud de escombrera, estos últimos con una importante colonización vegetal en la que domina el tojo.

7.- SPOLIC UDORTHENT,COMPACTO (Plataformas de escombrera con afloramiento de finos y/o pistas de mina).- Se incluyen en la misma unidad las superficies llanas, o de escasa inclinación, que forman penillanuras, bases de escalonamientos en taludes de escombrera, áreas de entorno a infraestructuras y las pistas de mina, generalmente continuación directa de aquellas, en las que afloran materiales finos, muy frecuentemente con un encostramiento superficial producto del efecto cementante de las soluciones de escorrentía, de alta fuerza iónica, sobre las gravas y partículas de tierra fina.

8.- SPOLIC UDORTHENT, MUY PEDREGOSO (Plataformas de escombrera con bloques y piedras).- Se trata de una variedad de las anteriores en las que parte de la superficie aparece ocupada por grandes bloques y piedras de diferentes tamaños.

9.- SPOLIC UDORTHENT, NO PEDREGOSO, MENOS ÁCIDO (Escombreras de Planta).- Ocupando una amplia extensión al este de la vacies de Arinteiro, en las proximidades a la planta de concentración, aparecen las escombreras que denominamos "de Planta", constituídas en su base por fracciones finas, limosas y limo arcillosas, producto de la sedimentación (en la balsa de lodos) de las aguas procedentes de los procesos de separación de minerales de la explotación. En su origen, estos lodos van enriquecidos en metales pesados y, la fracción liquida, en emulsionantes utilizados para la flotación. En la balsa inferior se observan actualmente los efectos de un ensayo de restauración a iniciativa de la propia empresa, con el desarrollo de manchas discontinuas de vegetación herbácea y arbustiva entre la que se elevan individuos arbóreos, actualmente aun con alturas generalmente inferiores al metro. Las principales especies que se reconocen en la zona son *Rubus fruticosus, Genista florida, Ulex europaeus, Ulex minor, Erica cinerea, Erica umbellata, Calluna vulgaris, Pinus pinaster, Acacia dealbata, Acacia melanoxilon, Robinea pseudoacacia, Eucaliptus viminalis, Agrostis capillaris, Agrostis stolonifera, Briza media, Avena sp, Matricaria chamomilla, Holcus lanatus , Malva neglecta, Rumex hydrolapathum, Plantago media, Umblicus pendulinus, Cirsium vulgare, Senecio vulgaris, Achillea millefolium, Feniculum vulgare, Melilotus sp, Carduus mutans, Eucaliptus globulus, Pinus pinaster.*

10.- AQUIC SPOLIC UDORTHENT, en escombrera de Planta. A pesar del bombeo, la balsa superior presenta en invierno una acumulación de agua en su parte central. Al NW de la superficie inferior, al pie del talud, aparece un área de encharcamiento.

11.- AQUIC/SPOLIC UDORTHENT, ESCARPADO (Vaguada hidromorfa con vegetación residual).- Entre taludes de diferentes escombreras se observan, en ocasiones, pequeñas superficies residuales, con presencia de especies arbóreas (entre las que se identifican mezclas de los géneros *Betula, Salix, Quercus*), y como herbácea representativa el *Pteridium aquilinum* actualmente asentadas sobre un lecho limo arcilloso cubierto de una capa de agua, de espesor variable, procedente de la erosión/escorrentía de las escombreras adyacentes.

12.-(AQUIC) SPOLIC UDORTHENT, ESCARPADO (Vaguada drenada artificialmente).- Solo identificamos en una ocasión esta unidad, cuyas características son próximas a las de la unidad 11, a excepción del drenaje artificial que se ejerce actualmente sobre ella, y el poseer menor desarrollo vegetal.

13.-TYPIC/ANDIC HAPLUMBREP (Superficie residual con monte bajo y/o arbolado) .- Entre las superficies de corta y escombrera permanecen en ocasiones manchas residuales, formando laderas o áreas de cierta entidad, no hidromorfas y generalmente con vegetación arbustiva y/o con repoblación de Pinus y Eucaliptus.

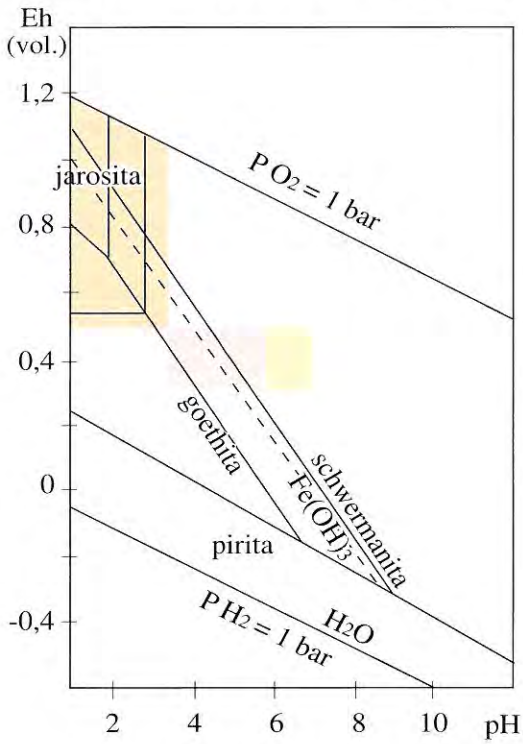
14.- Infraestructura .- Así englobadas se cartografían las zonas edificadas, las que presentan maquinaria fija de mina y sus accesos, zonas de ajardinamiento, aparcamientos ... etc.

ALGUNOS MECANISMOS PROPUESTOS PARA LA OXIDACIÓN DE LA PIRITA:

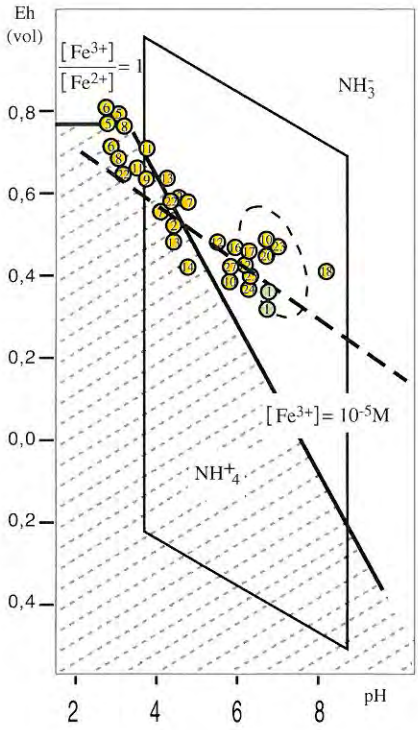
Stumm and Morgan (1996)
$2FeS_2 + 7.5O_2 + 7H_2O$ ==== $2Fe(OH)_3 + 8H^+ + 4SO_4^{2-}$

Carlson et al., (1992):
$FeS_2 + 11\ H_2O$=== $Fe(OH)_3 + 2SO4^{2-} + 19H^+ + 15e^-$

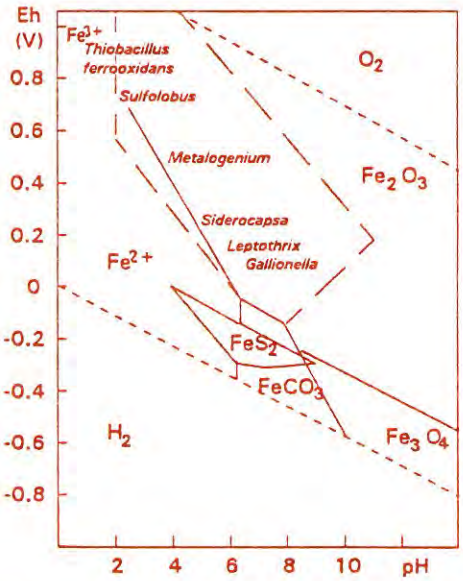
Nordstrom (1982):
$FeS_2 + 14\ Fe^{3+} + 8H_2O$=== $15\ Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 16\ H^+$



Estabilidad y metaestabilidad de minerales de Fe en los distintos escenarios pH-Eh identificados



Eh-pH de aguas fluviales en el área de Touro



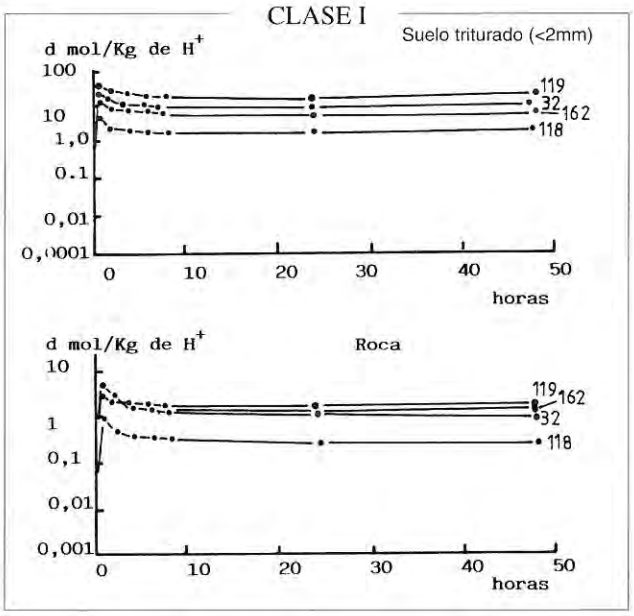
Dominio de diferentes colonias bacterianas relacionadas con el ciclo del S y del Fe según las condiciones Eh-pH (Grant y Long, 1985)

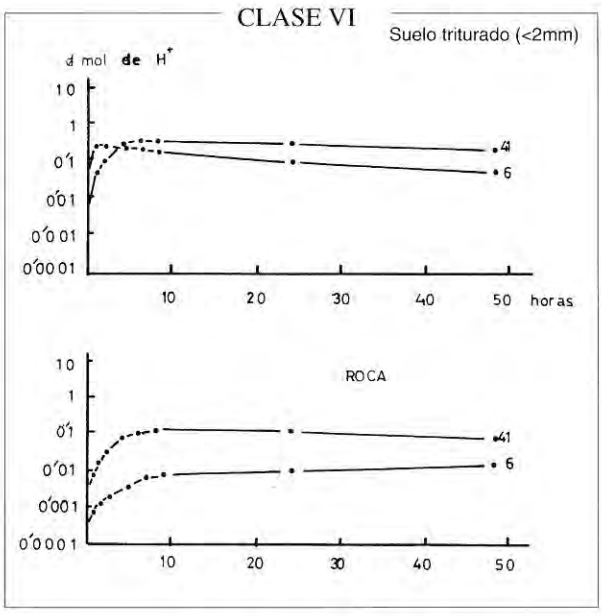
Colonias de Thiobacillus en aguas ácidas de la mina Touro y detalle al microscopio electrónico

Esquema utilizado para la clasificación de superficies de escombrera según el potencial de acidificación (pH de oxidación con H_2O_2 (1:20) (dmol H^+ Kg^{-1}= H_0)

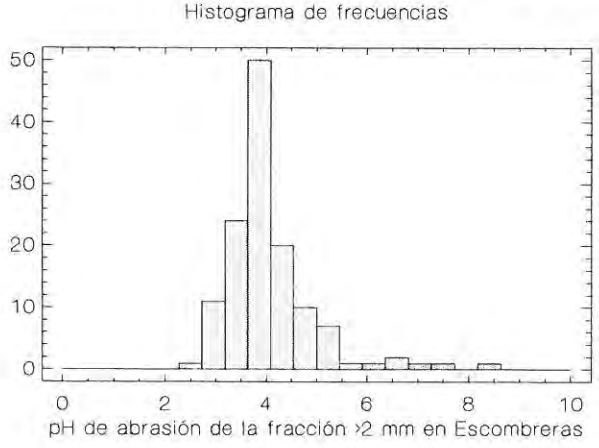
CLASES de Pot_{ac}	H_0-máximo (dmol/kg) (FRACCION <2mm)	H_0-equilibrio$_{50h}$ (dmol/kg) (FRACCION <2mm)	H_0-equilibrio$_{50h}$ (dmol/kg) FRAGMENTOS DE ROCA
I	1-10	1-10	1-10
II	1-10	-	1-10
III	1-10	-	1-10
IV	1-10	-	1-10
V	0.1-1.0	0.1-1.0	0.1-1.0
VI	0.1-1.0	0.1-1.0	-
VII	0.1-1.0	-	0.1-1.0
VIII	0.1-1.0	-	0.1-1.0
IX	<0.1	<0.1	<0.1

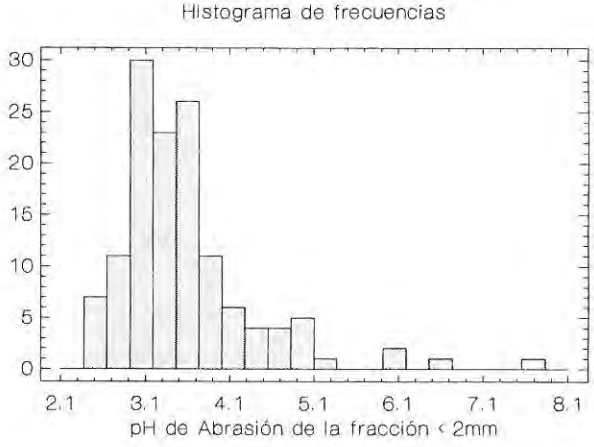
Cinética de oxidación de muestras representativas de dos clases de comportamiento.





Distribución de frecuencias del pH de abrasión en gravas y fracción menos de 2 mm (n=32)





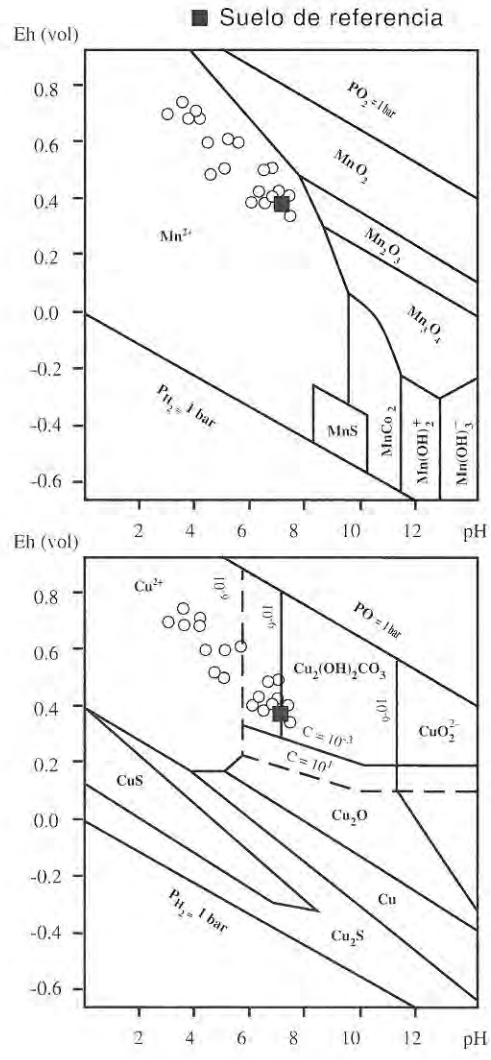
Datos analíticos de aguas pertenecientes a lagos del interior de la mina.

Muestra	pH	C.E. mS/cm	SO_4 ppm	Na ppm	K ppm	Ca ppm	Mg ppm	Cu ppm	Zn ppm	Mn ppm	Co ppm	Ni ppm	Al Tot ppm	Fe ppm
Balsa Roja	2.63	3.410	6860	20.0	5.0	700	136	3.0	0.7	33.0	1.1	1.0	36	97.0
C.Brand(Rojo)	3.04	2.483	3175	9.1	1.6	310	107	3.5	1.4	7.6	0.7	0.6	17	9.8
Lago Vieiro	3.13	1.749	1490	13.8	2.8	152	119	2.7	1.3	19.0	0.7	0.9	38	4.0
Lago 1 (abedul)	3.24	2.054	1340	10.1	2.0	60	151	4.5	4.0	25.6	1.2	1.6	117	2.1
Lago Arinteiro	3.70	3.265	10534	21.2	4.9	382	233	6.7	12.2	81.0	2.4	4.0	233	0.4
C.Brand(Blanco)	4.15	2.829	2832	13.1	1.7	750	168	0.3	0.6	6.7	0.4	0.5	5	0.4

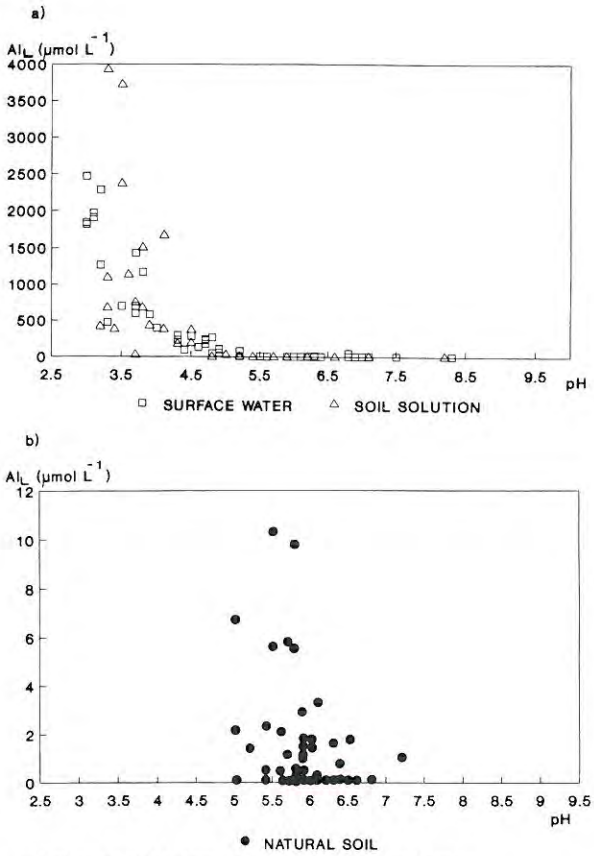
Valores medios e intervalos de concentración de elementos en aguas contaminadas (distribuidas según el grado de acidez), en comparación con aguas de rios de galicia, en mg L^{-1} (* en µg L^{-1}) .

() nº de muestras.

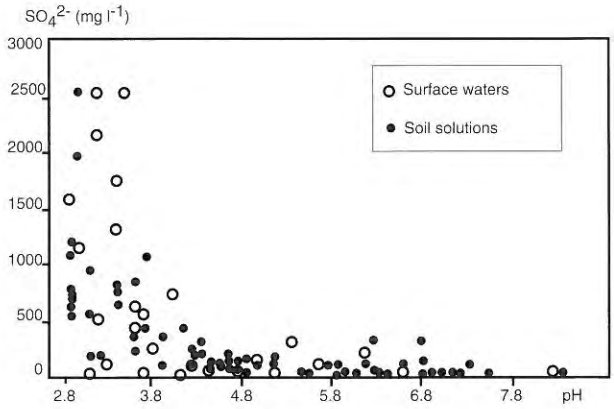
	pH <4,0 (21)	pH 4,0-5,0 (24)	pH 5,0-6,5 (25)	pH >6,5 (18)	Rios de amfibolita	Rios de Galicia
pH	3,30 3,0-3,8	4,52 4,0-4,9	5,94 5,0-6,4	7,0 6,6-8,3	7,2 7,0-7,5	7,1 6,1-8,1
SO_4	808,2 153-2541	156,7 33-435	43,4 0,3-314	13,1 0,1-40	6,1 3,4-16	6,3 0,9-27
Al_T	37,8 0,04-115	5,8 0,3-19	5,3 <0,01-54	0,2 0,01-1,4	0,01 <0,01-0,06	0,04 <0,01-0,2
Ca	132,1 <0,1-376	28,6 2,5-62	6,3 0,8-21	4,1 1,3-16	8,5 6-15	5,5 0,4-19
Mg	61,2 <0,1-232	23,6 5-86	4,4 1-14	2,6 1-4	4,1 3-6	5,4 0,6-32
Na	16,9 7-32	11,8 8-27	8,8 5-14	7,6 3-13	10,1 7-15	11,8 0,1-7
K	3,6 1-7	1,4 0,8-3	1,1 0,3-5	0,8 0,5-2	0,8 0,1-4	0,7 0,1-7
Si	7,7 1-34	3,8 0,7-13	3,7 1-11	6,7 1-34	2,0 1-3	1,8 0,5-4
Mn	18,7 <0,01-81	5,1 0,2-25	0,1 <0,01-0,7	0,02 0,01-0,1	<0,01	<0,01
Cu	1,10 <0,01-2,2	0,38 0,02-0,9	0,02 <0,01-0,3	0,004 <0,01-0,02	<0,1*	<0,1*
Zn	1,31 0,05-6,6	0,36 0,02-1,0	0,05 <0,01-0,5	0,03 <0,01-0,5	1,6* <0,1*-4,0*	1,5* <0,1-14*
Ni	0,94 0,0-2,0	0,34 0,0-0,7	0,003 0,0-0,05	<0,001	<0,01*	<0,01*



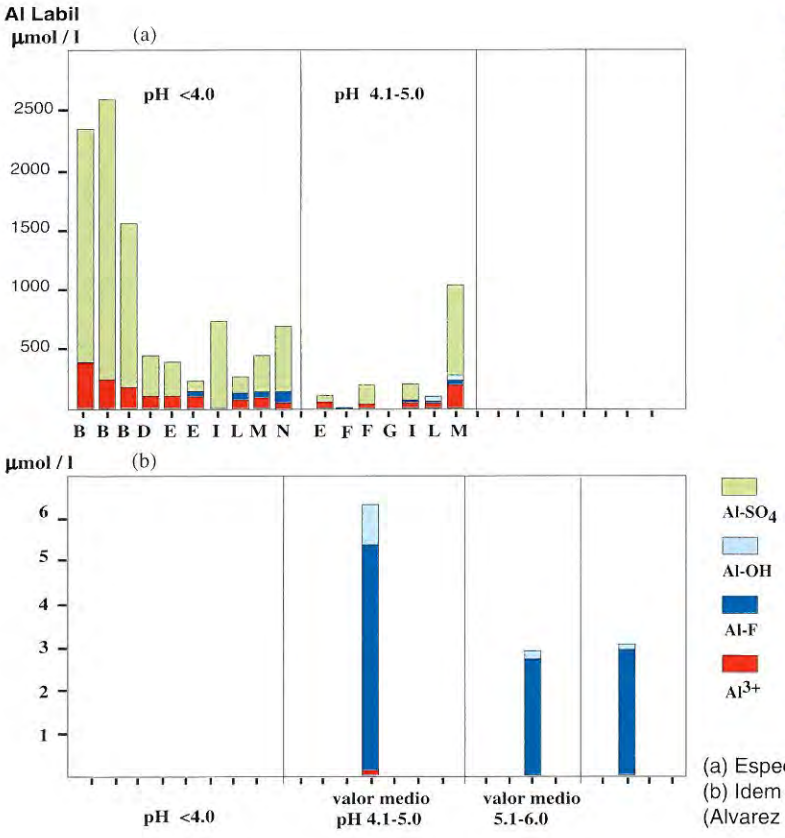
Diagramas Eh-pH para los sitemas Mn-C-S-O-H y Cu-C-S-O-H ($aMn=10^{-6}M$; $aS=10^{-3}M$, $aCu=10^{-6}M$) (Brookins,1988)



(a):Relación Al Lábil - pH en las aguas del área
(b): Valores frecuentes en ríos y disoluciones de suelos en áreas no contaminadas

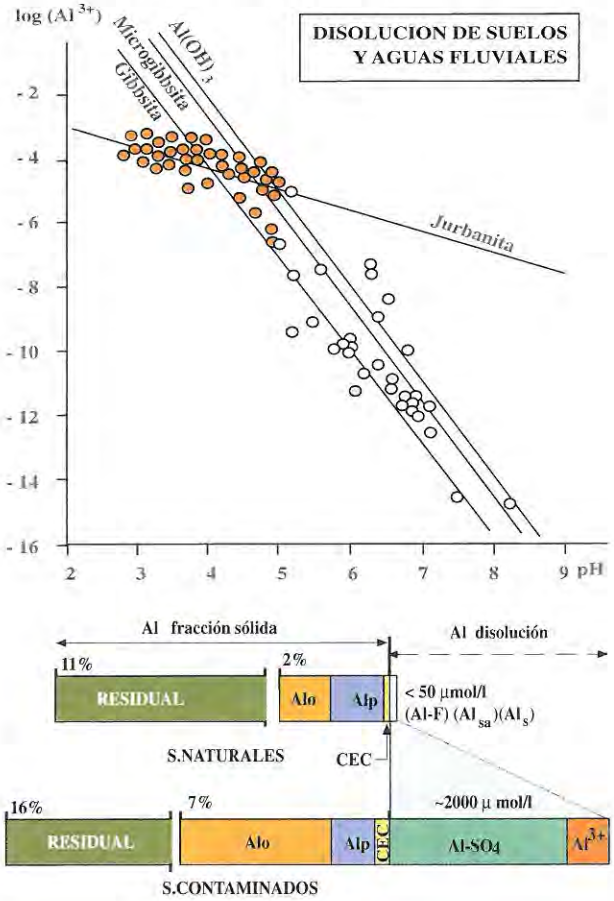


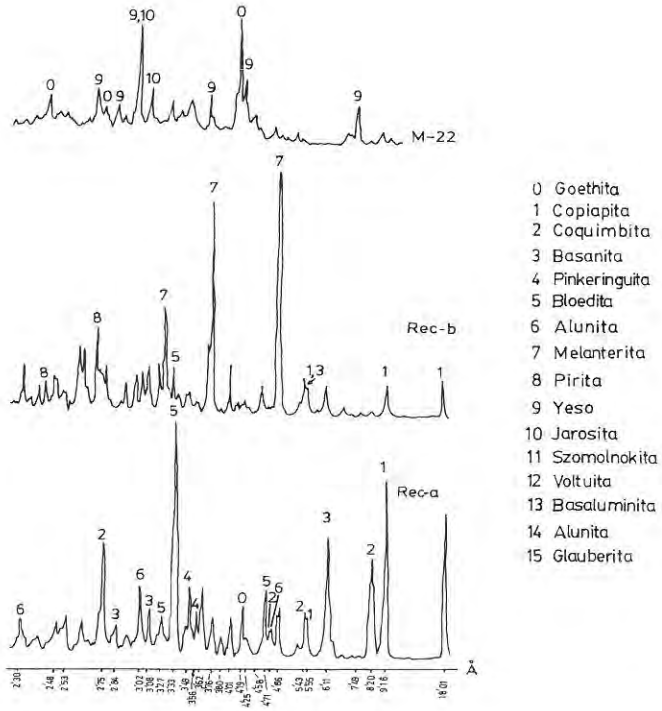
Relación entre el pH y la concentración de sulfatos en aguas superficiales y disoluciones de suelos del área de estudio



(a) Especiación de Al L en la disolución de fluvisoles afectados
(b) Idem en suelos de referencia, no contaminados
(Alvarez Rodriguez, P. Otero y C. de Anta)

Actividad de Al^{3+} en la disolución de los suelos frente a las curvas de solubilidad de diferentes minerales

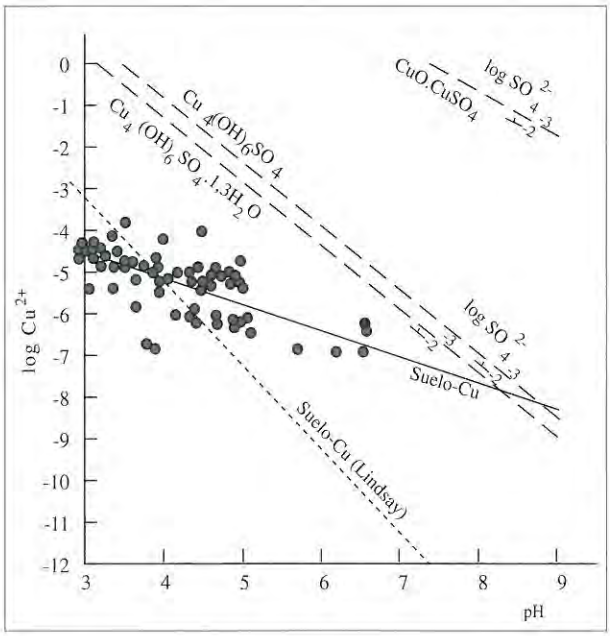


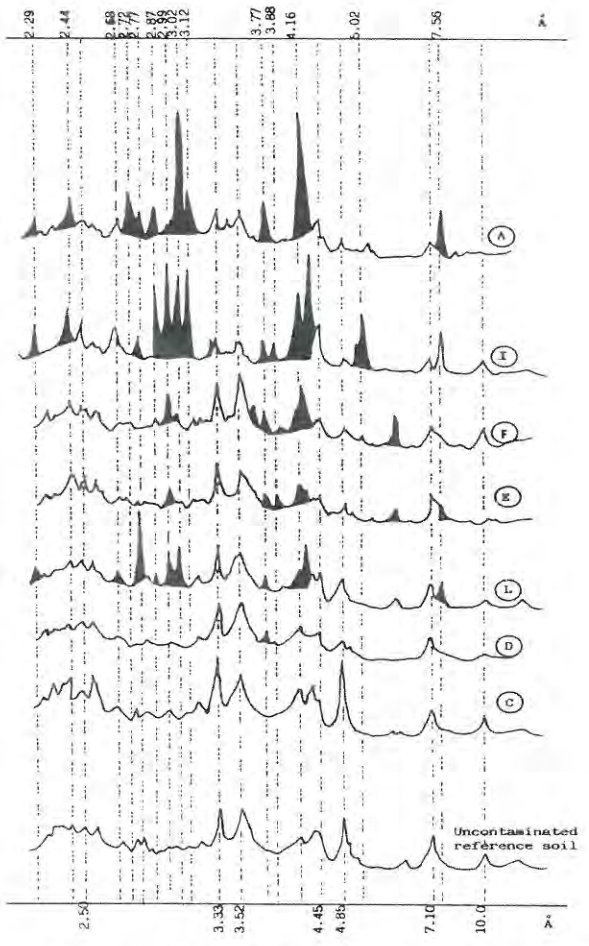


0 Goethita
1 Copiapita
2 Coquimbita
3 Basanita
4 Pinkeringuita
5 Bloedita
6 Alunita
7 Melanterita
8 Pirita
9 Yeso
10 Jarosita
11 Szomolnokita
12 Voltuita
13 Basaluminita
14 Alunita
15 Glauberita

DRX de algunos precipitados en cauces fluviales y superficies de mina

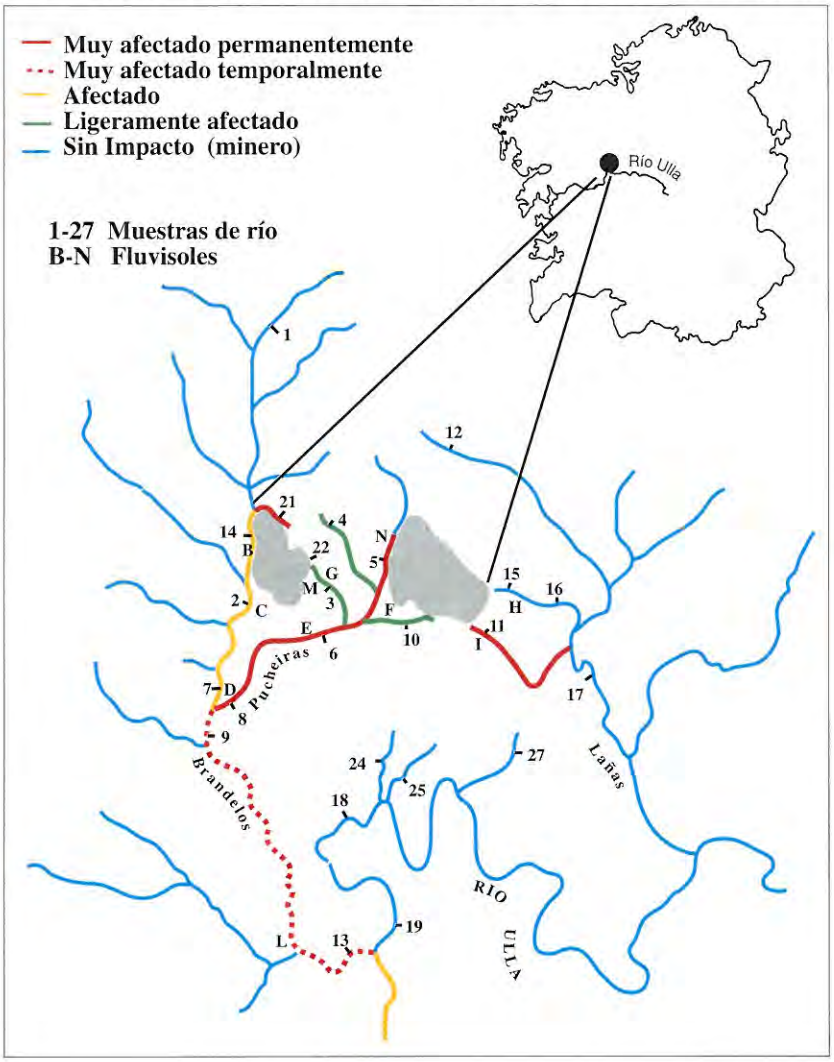
Actividad de Cu^{2+} en la disolución de los suelos frente a las curvas de solubilidad de oxisulfatos y suelo-Cu (Lindsay, 1969)



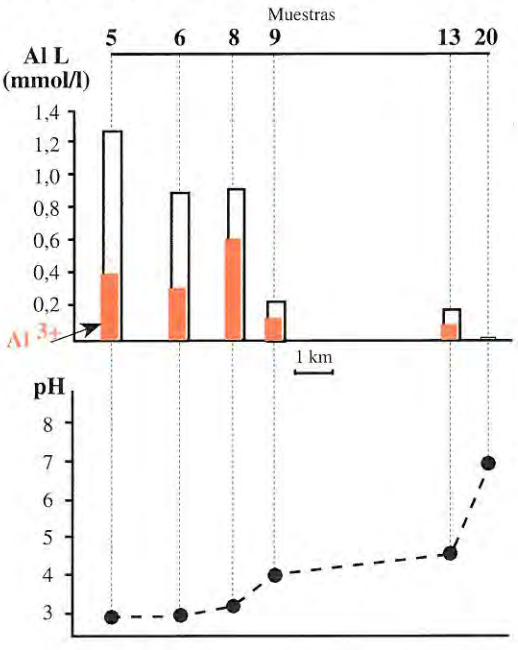


DRX de la fracción arcilla de hor. A de Fluvisoles afectados por AAM.
(A: patrón característico de precipitados evaporíticos de borde de cauce; en negro: difracciones no presentes en suelos no contaminados)

SINTESIS DEL ESTADO ACTUAL DE LA CUANCA DEL RIO BRANDELOS - ULLA



Evolución de la contaminación de aguas fluviales desde la mina al Río Ulla



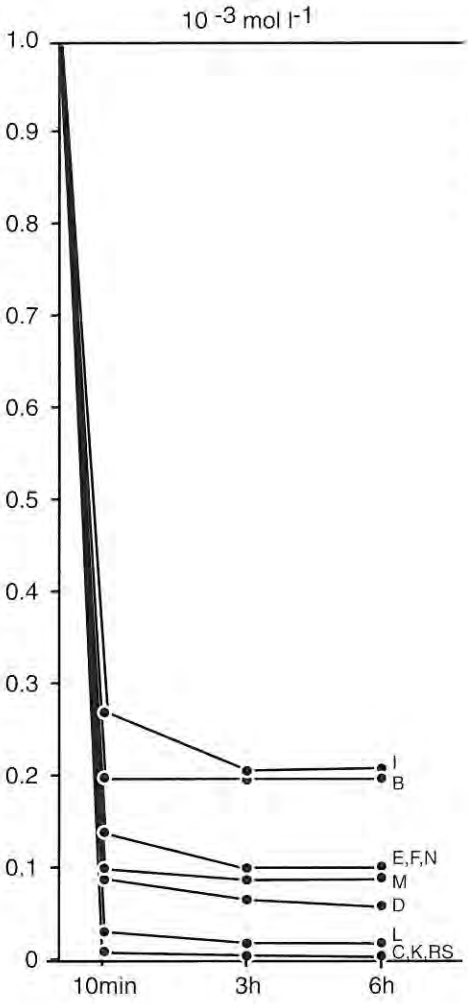
	Rio Brandelos	------- Rio Ulla-------		
Muestra	13	19	20	--
SEPTIEMBRE 1988				
C.E.(µS/cm)	413	72	104	88
pH	4.6	7.5	7.2	7.3
Eh(mv)	514	419	442	411
Al(ppm)	4.2	<0.01	0.04	<0.01
Sulfatos(ppm)	69.8	3.7	90.3	14.6
AGOSTO 1989				
C.E.(µS/cm)	661	91	112	84
pH	4.5	8.3	6.9	7.0
Eh(mv)	236	151	178	178
Al(ppm)	76.3	0.04	0.07	0.08
Sulfatos(ppm)	56.1	0.90	3.87	1.03
NOVIEMBRE 1989				
C.E.(µS/cm)	745	81	130	
pH	4.3	6.8	6.3	
Al(ppm)	7.80	<0.01	<0.01	
Sulfatos(ppm)	250	3.2	11.5	
FEBRERO 1989				
C.E.(µS/cm)	523	153	92	
pH	4.7	7.1	6.8	
Al(ppm)	0.015	<0.01	<0.01	
Sulfatos(ppm)	127	6.6	0.1	

Muestra	Actividades Recreativas		Vida piscícola y vida libre		Usos agrícolas		Abastecimiento para aguas potables.*	
	USA	UE	USA VP VL	UE	USA Granjas	Riegos	USA	UE
1								Fe,A
2				A	pH,Mn	pH	pH,Mn	Fe,A,pH,Mn
3				A	pH,Mn,Fe	pH	pH,Mn,Fe	Fe,A,Mn
4				A	Mn,Fe		Mn,Fe	Fe,A,Mn
5	pH	pH	pH pH	pH,A,N	pH,Mn,Fe,Cu?	pH	pH,Mn,Fe,S,Cu?	Fe,A,Mn,E,pH,S,Zn
6	pH	pH	pH pH	pH,A	pH,Mn,Fe,Cu?	pH	pH,Mn,Fe,S,Cu?	Fe,A,Mn,E,pH,S,Zn
7	pH	pH	pH pH	pH,A	pH,Mn		pH,Mn	Fe,A,Mn,pH Zn
8	pH	pH	pH pH	pH,A	pH,Mn,Fe	pH	pH,Mn,Fe,S	Fe,A,Mn,E,pH,S,Zn
9	pH	pH	pH pH	pH	pH,Mn!	pH	pH,Mn,Fe,S	Fe,Mn,E,pH,S,Zn
10								
11	pH	pH	pH pH	pH,A	pH,Mn,Fe	pH	pH,Mn,Fe,S	Fe,A,Mn,E,pH,S,Zn
12					A			A
13	pH	pH	pH pH	pH	pH,Mn	pH	pH,Mn	Fe,Mn,pH
14			pH pH		pH,Mn,Fe		pH,Mn,Fe	Fe,A,Mn,pH
15	pH	pH	pH pH		pH,Mn,Fe	pH	pH,Mn,Fe,S	Fe,Mn,pH,S
16			pH					Mn,A
17			pH					A
18								
19								A
20			pH					A
21	pH	pH	pH pH		pH,Mn,Fe	pH	pH,Mn,Fe,S	Fe,A,Mn,E,pH,S,Zn
22	pH	pH	pH pH		pH,Mn,Fe	pH	pH,Mn,Fe,S	Fe,A,Mn,E,pH,S,Zn
23								A
24								A
25								A
26	pH	pH	pH pH	pH,A,N	pH,Mn,Fe,Cu?	pH	pH,Mn,Fe,S,Cu?	Fe,A,Mn,E,pH,S,Zn
27								A

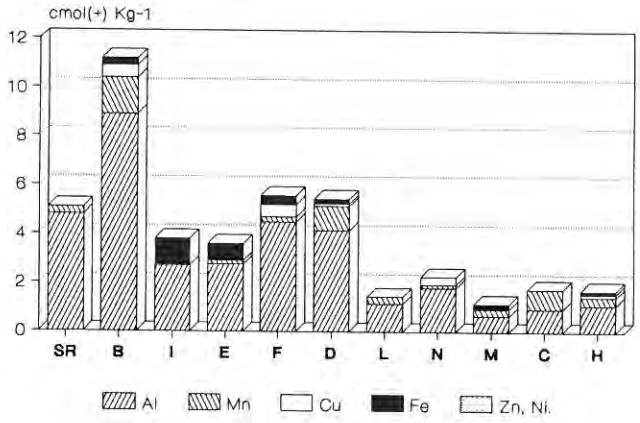
Principales limitaciones de las aguas fluviales para diferetes usos (A: exceso de amonio; E: C. eléctrica; pH; etc.)
Las normativas utlizadas no consideran Zn, Ni y Al que deben ser tenidos en cuenta

		LIMITACION	SINTESIS
Muestras	Lugar y tipo de muestra	Permanente ()Eventual	Permanente ()Eventual
29	Arinteiro nº16: Agua de traida	(pH)	(N.P.)
30	Arinteiro nº16: Pozo de 5m	(pH)	(N.P.)
31	Arinteiro nº14: Pozo de 8m	(pH)	(N.P.)
32	Arinteiro fuente/lavadero	(pH)	(N.P.)
33	Arinteiro fuente/ladera mina	pH,CE,$SO_4^=$,Cu,Cd,Mn,Zn,Al	N.P. y GRAVEMENTE PELIGROSA
34	Torreis de Abaixo: Traida	pH,CE,Cu,Mn.	N.P. y GRAVEMENTE PELIGROSA
35	Torreis de Abaixo nº7: Pozo 5m	-	P. de tipo A2
36	Torreis de Abaixo nº8: Pozo 31m	pH	N.P.
37	Torreis de Abaixo nº9: Pozo 4m	(pH),CE	N.P.
38	Torreis de Abaixo nº9: Fuente	pH,(CE)	N.P.
39	Goritas -J.Martinez-: Pozo 50m	-	P. de tipo A1
40	Goritas -Casal-: Fuente	(pH)	(N.P.)
41	Goritas fuente/lavadero	pH	N.P.
42	Touro-Santaya nº12: Pozo 29m	pH	N.P.
43	Touro-Santaya nº13: Pozo 15m	(pH)	(N.P.)
44	Mourelos Poblado: Fuente	pH	N.P.
45	Mourelos Poblado nº12: Pozo 18m	-	P. de tipo A2
46	Castelo -Parrillada G.-: Pozo 45m	(pH)	(N.P.)
47	Goritas -A. Puga-: Pozo 2m	(pH),CE.	N.P.
48	Torreis de Abaixo: Fuente B	-	P de tipo A2
49	Goritas nº12: Pozo 5m	(pH)	(N.P.)
50	Goritas: fuente/montana	-	P. de tipo A2
51	Goritas: fuente/prado	(CE)	P. de tipo A2
52	Goritas nº10: Fuente	pH	N.P.

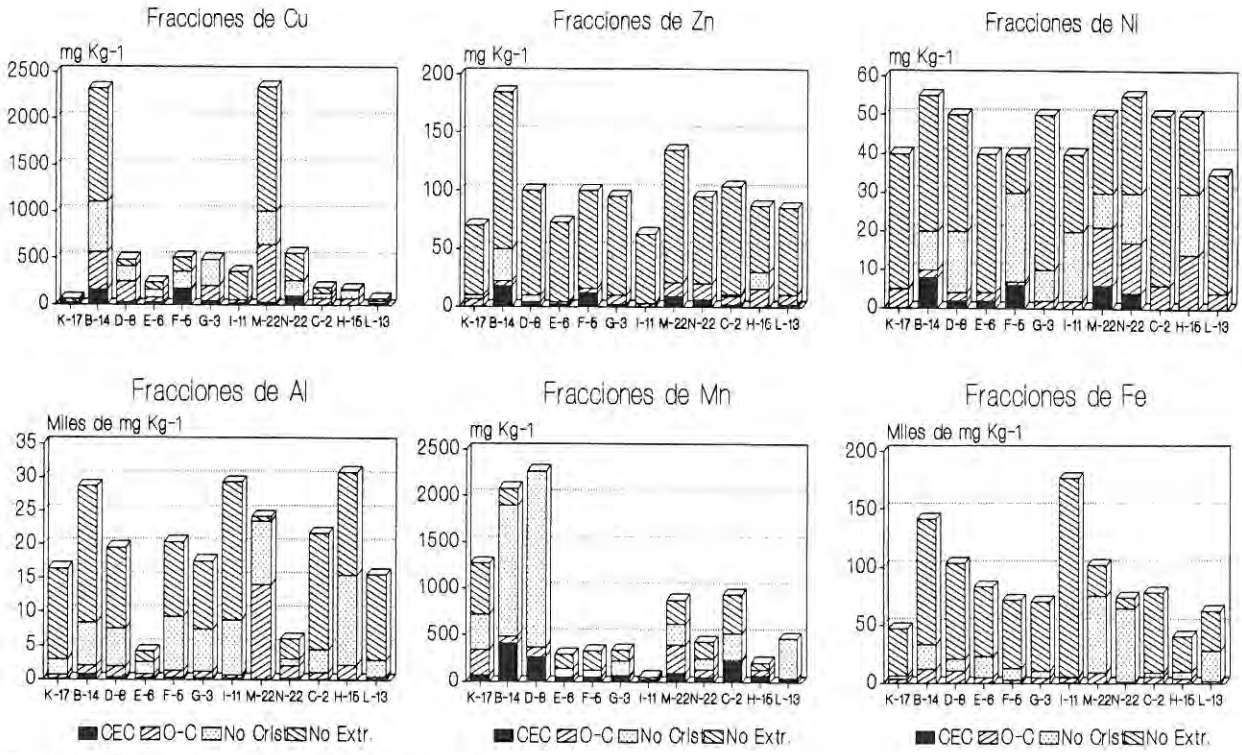
AGUAS PROFUNDAS: Caracterizacion de aguas de pozos y manantiales recogidAs en la zona (diferentes fechas 1988 y 89) en función de su potabilidad de acuerdo a la normativa europea.
P: potabilizable (A1: potable; A2 y A3: potabiliable)
NP: no potabilizable (NP): eventualmente no potabilizable



Pérdida de la CNA en hor. A de Fluvisoles de la cuenca. Neutralización de H^+ tras adición de disolución de H_2SO_4, pH3 (1:2.5) (RS: Suelo de referencia)



Contenido de algunos metales en el CIC (SR: Suelo de referencia)



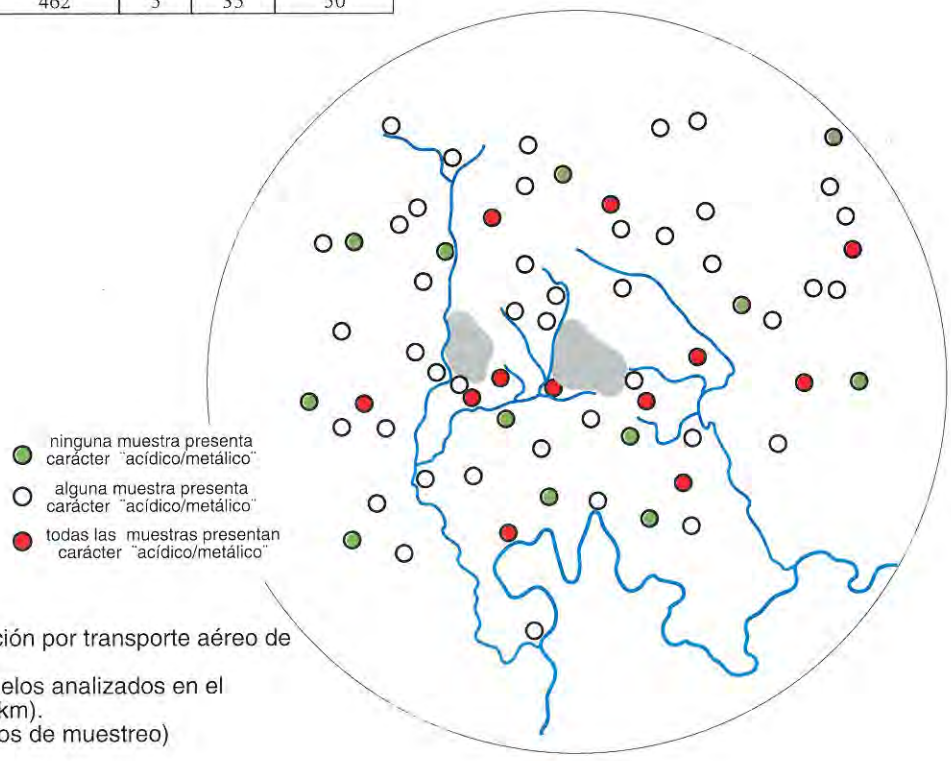
Fraccionamiento de metales en los Fluvisoles
CEC: extracción con ClNH4 1M; OC: extracción CuCl2 - CEC; No Cris: ex. oxalato - CuCl2; No extr.: total - oxalato

Análisis de muestras vegetales tomadas en la mina (después de lavado con ultrasonidos) (mg/kg)

CORTA 1	Fe	Mn	Cu	Zn	Al	%S	%C	%N	Ca	Mg	Na	K
Juncos	4200	280	230	75	1810	0.44	39.1	2.2	2790	2688	5300	37000
Juncos e.n.	33810	150	800	42	4900	0.74	36.4	1.4	2080	5334	6000	11000
Brezos(flor)	660	7176	20	5	240	0.08	54.4	0.8	4200	714	1100	4100
Brezos	836	354	36	11	2110	0.162	55.3	0.8	3210	1365	710	5500
Acículas (pino)	968	233	26	37	420	0.22	54.6	1.0	4780	1239	1600	4000
Hormidium (verde)	47670	108	590	89	9100	0.47	38.6	3.0	1440	4179	300	1300
Hormidium (negro)	68040	146	1950	52	12210	0.44	28.3	11.6	1700	5250	360	6600
Typha	242	735	35	21	120	0.17	50.5	1.0	2700	1701	850	5000

Análisis de muestras vegetales tomadas en las proximidades a los cauces

FLUVISOLES	Fe	Mn	Cu	Zn	Al
Gramineas ≠ fechas					
B-14	1085-2123	460- 528		17-20	275 - 415
C-2	322-1833	255- 395	7-32	17	200 - 2000
D	1350	207	15	5	572
E	2861	835	32	30	1980
F	740-1305	300-650	7-38	7-15	225-1785
H	15000	950	12	20	1812
I	193- 448	400-700	2	5-75	135 -170
M	990-1298	435-670	30-35	25-40	420- 500
Referencia (región)	170	132	12	25	52
Hojas de Alnus					
B-14	190- 635	1000 - 4500	15-30	65-150	145-2600
C-2	290-1108	303 - 743	7-40	35-45	170-545
D	213- 225	2975 - 6575	10-12	60-80	82-127
E	365- 778	1225 - 2000	7	40-50	97-180
F	185-1475	135 - 1625	7-20	15-50	50-425
H	248	3875	13	93	110
I	470-605	1232- 3975	10-13	20-45	160-217
M	320	3075	13	140	137
Referencia (región)	115	462	5	35	50



Evaluación de riesgos de polución por transporte aéreo de partículas
Localización de muestras de suelos analizados en el entorno a las áreas de mina(15km).
(cada círculo representa 3 puntos de muestreo)

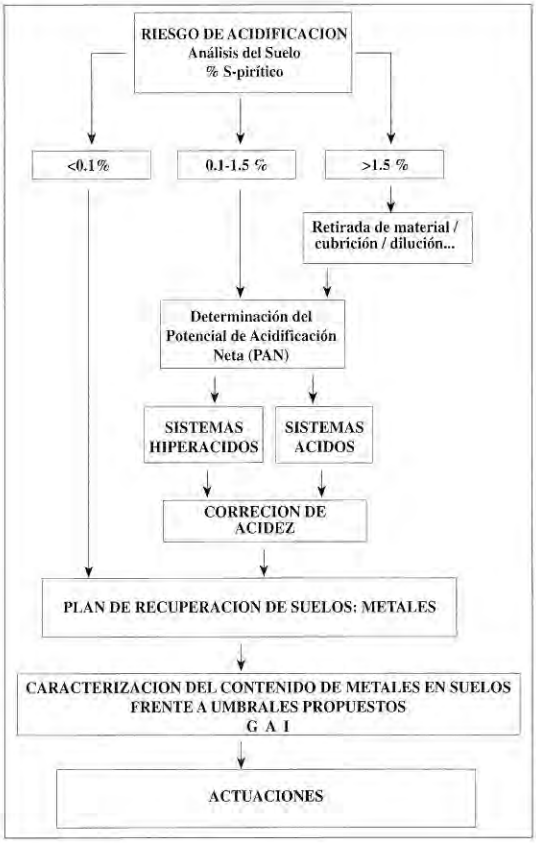


Diagrama de flujo general de actuaciones de recuperación

Algunas de las alternativas de actuación consideradas como fase previa al diseño del programa de recuperación

LA CUENCA DE AS PONTES: EXPLOTACIÓN DE LIGNITOS Y RESTAURACIÓN DE SUELOS DE MINA

C. Monterroso[1], A. Gil Bueno [2], C. Val Caballero [2] y F. Macías[1]

[1]Dpto. Edafoloxía e Q. Agrícola, Univ. Santiago *[2]Dpto. de Restauración de Terrenos, ENDESA*

EL COMPLEJO MINERO-ELÉCTRICO DE AS PONTES

El Centro Mineroeléctrico de As Pontes, en la provincia de A Coruña, es el complejo de mayor producción que ENDESA tiene asociada a la combustión de carbón en todo el territorio español. Todos los elementos del complejo presentan unas dimensiones asombrosas: la mina a cielo abierto y la escombrera exterior, el sistema de arranque y transporte de materiales, la central térmica, el parque de regulación de carbón y la depuradora de efluentes líquidos (Tabla 1).

La explotación a cielo abierto se inició, en su forma actual, en 1976 con el objetivo de realizar la extracción del lignito destinado a la alimentación de una central térmica con una potencia instalada de 1400 Mw (4 grupos de 340 Mw). La extracción del lignito exige un movimiento de unos 900 Mm^3, siendo el ratio medio de 2.78 m^3 de estériles /Tm de carbón. El carbón de la mina es pobre en poder calorífico y tiene elevado contenido en azufre. Por razones ecológicas, actualmente, la central térmica es alimentada parcialmente con *carbón ecológico* importado, estando previsto el final de la explotación del carbón autóctono en torno a 2007.

Tabla 1. Algunos datos del complejo minero-eléctrico de As Pontes

Morfología del yacimiento		**Estériles**	778 10^6 m^3
Superficie total	15 km^2	**Escombrera**	
Profundidad máxima	500 m	Superficie total	15 km^2
Altitud media	340 m	Altura final	200 m sobre la base
Pluviometría		**Sistema de explotacion**	
Máxima anual	2604	Tipo	Alemán
Mínima anual	1021	*Excavadoras*	
Media anual	1650	Peso	2050 Tm
Máxima mensual	720	Presión sobre el suelo	0.8 kg/m^2
Máxima diaria	109	Velocidad de desplazamiento	2-7 m/min
Mina		Diámetro del rodete	11 m
Superficie explotable	10 km^2	Número de cangilones	16
Profundidad explotable	275 m	Capacidad del cangilón	1640 l
Bancos finales	22	Capacidad de extracción	1100-1800 m^3 f7hora
Reservas de carbón	280 10^6 Tm	*Apiladoras*	
Central Térmica		Peso	1100 Tm
Potencia instalada	1400 Mw	Presión sobre el suelo	0.75 kg/m^2
Consumo anual	12-13 10^6 Tm	Velocidad de desplazamiento	6 m/min
Consumo diario	40000 Tm	Longitud de la pluma	60 m
Capacidad del parque	250000 Tm	Distancia máxima de apilado	113 m
Producción anual de cenizas	3 10^6 Tm	Capacidad de vertido	5500 m^3s/hora
Producción diaria de cenizas	9000 Tm		

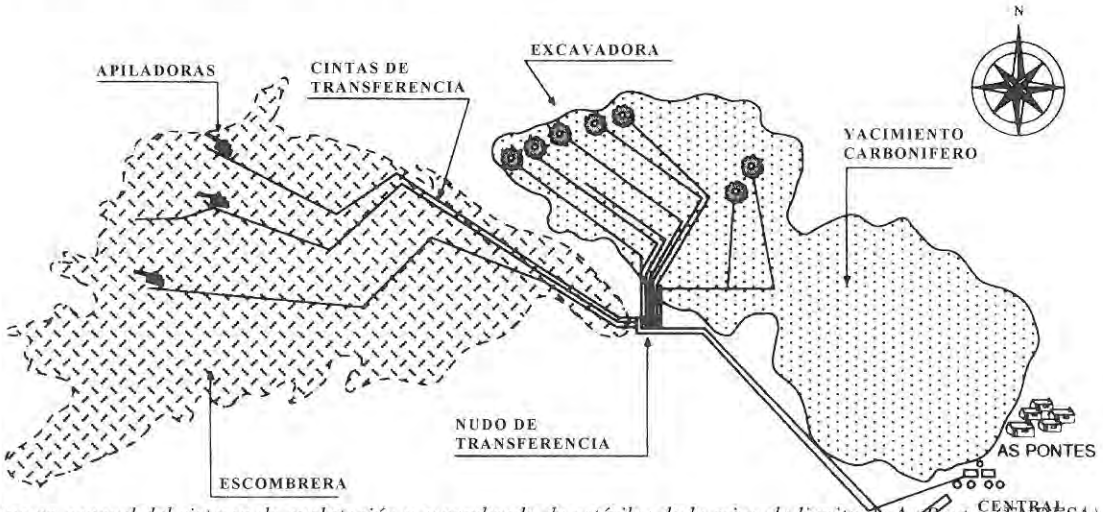


Fig. 1: Esquema general del sistema de explotación y escombrado de estériles de la mina de lignito de As Pontes (ENDESA).

EL YACIMIENTO

Abarca una superficie de 6 Km de longitud en dirección NW-SE y 2.5 Km de anchura en dirección NE-SO con una profundidad máxima superior a los 400 m que ocupa la depresión de As Pontes; una laguna endorreíca rellena por materiales terciarios y cuaternarios. Un estrechamiento central divide el área de explotación en dos campos (Este y Oeste)

El marco del que proceden los sedimentos está compuesto por rocas metamórficas, de diferente composicón mineralógica, del Precámbrico Superior (esquistos y neises porfiroides de la unidad Ollo de Sapo) y del Paleozoico Inferior (filitas, cuarzofilitas y cuarcitas), siendo las segundas las que ocupan la mayor extensión del zócalo de la cuenca (Fig. 2, Tabla 2).

El relleno de la cuenca tuvo lugar durante el Terciario, especialmente durante el Mioceno. El proceso de sedimentación se produjo, seguramente, por redes aluviales de escasa entidad (Bacelar et al., 1988, Santanach et al., 1988). La evolución de la cuenca, dirigida por procesos tectónicos, originó medios deposicionales, lacustres-palustres, en los que la acumulación de depósitos orgánicos dio lugar a la formación del lignito.

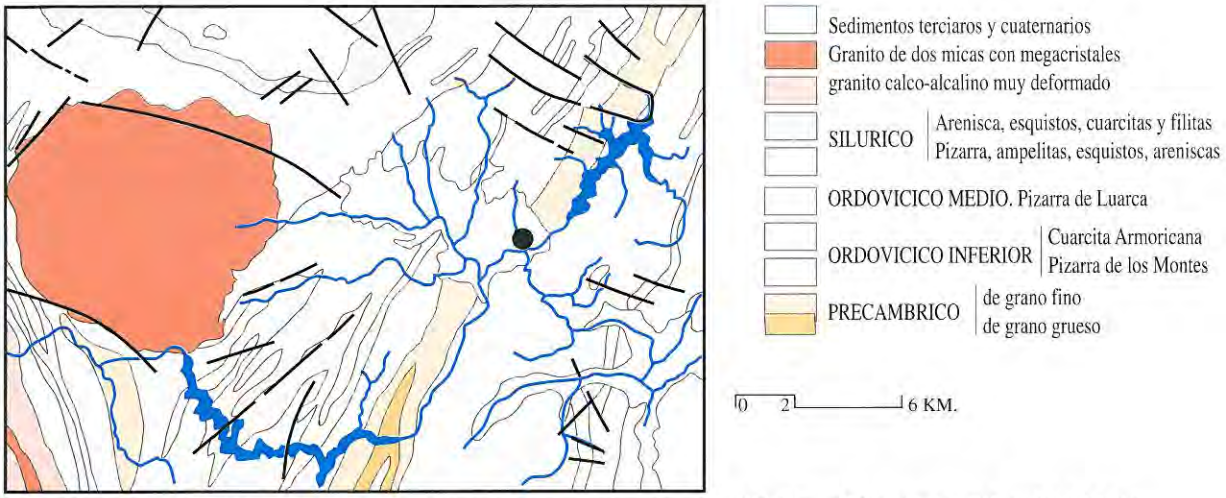


Fig.2: Marco geológico de la cubeta sedimentaria de As Pontes (IGME, 1984 de escala 1/200.000)

Tabla 2: Composición mineralógica de las unidades paleozoicas y precámbricas del marco de la cubeta sedimentaria de As Pontes (Dpto. de Investigación e Ingeniería de ENDESA).

FORMACIONES	MINERALES PRINCIPALES	MINERALES ACCESORIOS
F"3 y niveles de F4	Filosilicatos tipo caolinita	Q y Materia Carbonosa
F"3 y niveles de F4	Filosilicatos tipo caolinita y Materia Carbonosa	Q
F2, F3, F'3 y niveles de F4	Q (15-20%) y Filosilicatos tipo caolinita	Materia Carbonosa
F1, F'4	Q (10-20%), Caolinita y Mat. carbonosa	Opacos, Turmalina escaso, Circón, Clorita y Opacos oxidados
F1	Q (20-25%), Moscovita	Plagioclasa, Clorita, Opacos, Circón, Turmalina y Rutilo muy escaso, Mat. carbonosa dispersa
CF2	Q (20-40%), Moscovita	Opaco, circón
CF1, F3, CF3 y niveles de F1	Q (25 -40%), Moscovita, Clorita, Biotita y Plagioclasa	Opacos, Circón, Turmalina y Oxidos rojizos
F5 y niveles de F1, F2, CF1, CF2 y F'4	Q (50-90%), Moscovita, Biotita, Plagioclasa y Clorita	Opacos, Circón, Rutilo, Turmalina, Oxido s rojizos y Mat. Carbonosa
C	Q (90%)	Caolinita, Opacos finos y Circón
C'	Q (90%), indicios de Mat. Carbonosa	Opacos y Caolinita
M	Q (30 -40%), Plagioclasa, Moscovita y Biotita	Oxidos de Fe y Opacos dispersos
E	Q, Moscovita, Biotita y Plagioclasa	Opacos, circón y Apatito
G	Q (30 -40%), Plagioclasa, Moscovita y Biotita	

Q = % en cuarzo de la formación. Opacos = sulfuros metálicos, fundamentalmente pirita y en menor medida calcopirita

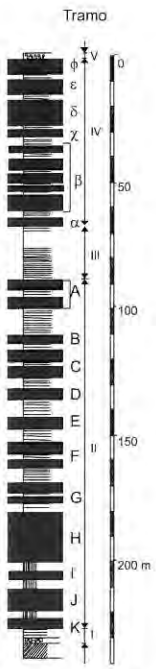


Fig. 3 Columna estratrigráfica "tipo" del yacimiento de As Pontes (Dpto. de Investigación e Ingeniería de ENDESA).

Los depósitos sedimentarios están constituidos por una serie de lignitos, arcillas carbonosas, arcillas, arenas y margas arcillosas, con frecuentes cambios laterales de facies y pliegues, recubiertos por sedimentos cuaternarios de textura más gruesa. De muro a techo se diferencian 5 tramos (Fig. 3):

Tramo I: capa sobre el Paleozoico alterado, discontínua e irregular formada por margas, arcillas verdes y verde-azuladas, con un espesor máximo de 40 m. Ocasionalmente presenta intercalaciones de lignito.

***Tramo II*:** alternancia de arcillas, lignito común, lignito xiloide y abundantes niveles de piropisita.

***Tramo III** o "**tramo detrítico**":* capa de 10 a 30 m formado por arcillas marrones y limos grises y verdes

***Tramo IV*:** alternancia de las capas de lignito y arcillas, sin existir niveles de piropisita.

***Tramo V*:** 2-3 m de materiales cuaternarios de origen fluvial y en los bordes depósitos coluviales.

El lignito se incluye entre los lignitos del *Grupo Atlántico*, formados entre el Aquitaniense y finales del Terciario bajo condiciones climáticas tropicales o subtropicales húmedas. En la cuenca este lignito presenta tres variedades: lignito común, piropisita y lignito xiloide. El **lignito común** es el más abundante y de peor calidad, formado a partir arbustos y plantas herbáceas, con aspecto terroso y color de rojizo a negro. El **xiloide**, muy duro, se formó a partir de troncos, raices y ramas de árboles, cuya estructura se identifica fácilmente. La **piropisita**, de textura amorfa y color pardo-anaranjado, es la variedad de mejor calida, compuesta por materias resinosas fósiles (Tabla 3)

Tabla 3. Características y composición de los lignitos del yacimiento de As Pontes (Cabal, Bacelar)

	Carbón bruto		Carbón Seco			
Lignito pardo	P.C.I. (cal/g)	% H_2O	% Cenizas	% Volátiles	% C. fijo	% Azufre
Común	1900	49	26	42	32	3.5
Xiloide	2100	48	21	42	37	2.5
Piropisita	2900	47	17	63	20	1.5

EL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN

La variedad de espesores y de calidad de los sedimentos terciarios, que oscila entre arcilla pura y lignito pardo, ha obligado a aplicar criterios de **extracción selectiva** de las capas de espesor y calidad adecuada para su consumo en la central, lo que ha limitado la aplicación de minería de transferencia. La extracción del lignito exige un movimiento de unos 900 Mm^3, siendo el ratio medio de 2.78 m^3 de estériles /Tm de carbón.

El sistema de explotación empleado para la extracción de los materiales terciarios (lignito y estériles) es el conocido como **"Método Alemán"** para minería a cielo abierto, que utiliza como maquinaria de arranque las rotopalas o excavadoras de rodetes, complementadas por cintas transportadoras. Estas cintas confluyen en la zona **denominada "Nudo de transferencia"** en donde se desvía el lignito hacia la central térmica y el estéril, junto con las cenizas resultantes del proceso de combustión, hacia la escombrera. El vertido del estéril se realiza a través apiladoras sinfín que llevan a cabo esta operación mediante pasadas sucesivas de apilado en niveles de 10 m de altura y 12 m de profundidad, tomando como base el piso de la propia máquina (Fig. 1).

La explotación ha tenido numerosos **problemas** que han condicionado el desarrollo de las labores, entre ellos destacan:

1. **Condicionantes geológicos**: distribución espacial del lignito y los estériles, cambios laterales de facies, tectónica terciaria y de bordes
2. **Condicionantes geotécnicos**: estabilidad de taludes finales y bordes de mina y de escombrera, cercanía al núcleo de As Pontes, estabilidad de zona de infraestructura y movimiento de máquinas
3. **Condicionantes hidrogeológicos**: baja permeabilidad de los materiales de la cuenca, depresión del nivel piezométrico, drenaje de áreas inestables y zonas próximas al núcleo de población, control y eliminación de las aguas externas e internas del yacimiento.
4. **Condicionantes de la planificación:** diseño de taludes finales, niveles de producción y consumo, capacidad del parque de regulación, dificultades climáticas
5. **Condicionantes de la explotación:** materiales duros, dificultad de selección en áreas tectonizadas, clima, impactos ambientales...

DATOS CLIMÁTICOS

Tabla 4: Valores mensuales medios para algunos parámetros climáticos en la estación de As Pontes.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
T	6.7	6.8	8.5	9.7	12.1	14.9	17.1	17.3	16.1	13.1	9.2	7.3	11.6
TM	10.6	11.2	13.5	14.3	16.8	20.1	22.2	22.7	21.5	18.1	13.6	10.9	16.3
Tm	2.7	2.7	3.6	5.1	7.3	10.0	12.1	11.9	10.6	8.2	5.1	3.8	6.9
Tmax	16.3	17.9	21.3	22.5	25.7	29.0	31.2	30.8	30.3	25.9	19.4	16.2	23.9
Tmin	-3.6	-3.7	-2.4	-0.8	1.6	4.6	6.0	6.2	4.2	1.6	-1.1	-3.2	0.9
P	228	188	160	119	112	72	39	51	101	157	200	251	1678
ETP	16	23	47	69	97	108	122	101	58	39	17	15	713
HR	84.3	82.2	79.4	78.5	77.7	77.7	77.7	78.3	79.4	82.3	83.1	84.5	80.0

T: temperatura media (°C); TM: temperatura media de las máximas; Tm: temperatura media de las mínimas; Tmax: temperatura media de las máximas absolutas; Tmin: temperatura media de las mínimas absolutas; P: precipitación; ETP: evapotranspiración potencial; HR; humedad relativa.

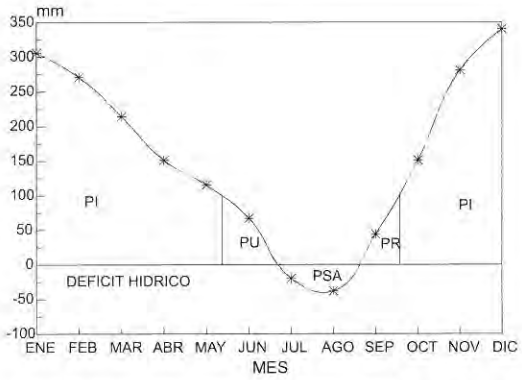


Fig.4: Balance hídrico mensual en As Pontes, considerando una reserva de agua útil del suelo de 100 mm. PI= Período de Infiltración, PSA= Período de Sequía Absoluto, PR=Período de Recarga del Suelo.

La coincidencia de los períodos de mínimas precipitaciones y máximos valores de evapotranspiración deriva en la aparición de un período de déficit de humedad que comienza en Mayo y se prolonga hasta Septiembre. La rigurosidad de la sequía en el suelo depende de la capacidad de retención de agua del suelo que definirá su nivel de reserva del humedad. Haciendo el balance hídrico mensual por medio del cálculo lineal entre ETP y precipitación y teniendo en cuenta una reserva estandar de 100 mm (Fig. 4) se perfila un *período global de sequía* (PGS = PU + PSA +PR) que dura del orden de 125 días, lo que supone que durante una parte importante del año el suelo presentará algún grado de sequía.

LA ESCOMBRERA: OBJETIVOS DE RESTAURACIÓN

La escombrera albergará unos 960 Mm^3 de estériles y tendrá una superficie final de unas 1400 ha. La altura máxima prevista es de 264 m desde la base, lo que corresponde a la cota 606. Por razones técnicas de escombrado y condicionantes de estabilidad de los taludes finales, se ha ubicado en el antigüo valle del rio Almigonde, al oeste de la explotación. De planta sensiblemente triangular, ocupa una superficie de unos 13 Km^2. El conjunto mina-escombrera abarcan un total de 25 Km^2.

El diseño de la escombrera se ha llevado a cabo aprovechando la división en niveles realizada por el propio laboreo, consistente en subdividir el talud general en un conjunto de taludes parciales y bermas que permiten un mayor control de la escorrentía (Rivas *et al.*, 1988). En función de la pendiente del talud, el ancho de los niveles varía entre 60 y 100 m. Estos niveles drenan hacia el Este o el Oeste según el drenaje general de la escombrera. Las pendientes medias de las distintas superficies construídas son del 2.5% para las bermas (con interrupciones mediantes muretes y cunetas cada 20 m) y del 20% para los taludes entre las bermas (Fig. 5). El diseño permite **la estabilidad de la escombrera** incluso en condiciones de saturación de agua.

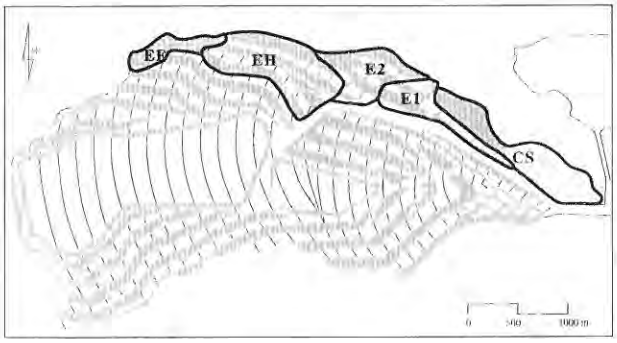


Fig. 5: Esquema general del sistema de explotación y escombrado de estériles de la mina de lignito de As Pontes (ENDESA.

La restauración de la escombrera ha tenido como objetivos principales (Gil y Val, 1988):

Creación de una cubierta vegetal que controle la erosión y la calidad de las aguas y propicie la formación de un suelo productivo.
Recuperación de las aptitudes potenciales del suelo anteriores a la explotación.
Integración paisajística.

Los condicionantes principales para alcanzar estos objetivos derivan del **desfase** entre el inicio de la restauración y el de explotación, lo que limita la disponibilidad de tierra vegetal, la elevada **pluviometría** que limita el periodo anual de ejecución y heterogeneidad de los **materiales escombrados** con presencia de sulfuros y texturas extremas.

LOS MATERIALES A ESCOMBRAR

El **material escombrado** está constituido por los sedimentos terciarios estériles, intercalados entre las capas de carbón explotables, por filitas del borde de la cuenca, que deben ser excavados por razones de estabilidad geotécnica, y por cenizas y escorias procedentes de la central térmica. Algunos materiales cuaternarios y capas superficiales de suelos también se apilan, utilizándose posteriormente para la mejora de las superficies externas. En las tablas 5 y 6 se presentan algunas propiedades de distintos tipos de materiales (Gil et al., 1990, Monterroso y Macías, 1992)

Tabla 5: Propiedades químicas de las filitas del borde del yacimiento de As Pontes: rangos, medias y desviaciones típicas de distintos parámetros obtenidos en los tramos F1, F2 y CF1.

	Tramo F1			Tramo F2			Tramo CF1		
	Rango	x	ds	Rango	x	Ds	Rango	x	Ds
pH(H_2O)	2.42-8.82	4.86	1.56	2.30-7.47	3.42	1.37	3.95-9.64	7.69	1.48
%S	<0.01-2.87	0.31	0.49	0.01-1.92	0.73	0.57	<0.01-0.88	0.17	0.15
Complejo cambio									
Ca($cmol_c Kg^{-1}$)	0.03-20.4	2.47	2.80	0.10-0.50	0.33	0.11	1.05-10.37	5.34	2.88
Mg($cmol_c Kg^{-1}$)	0.04-6.57	0.74	0.56	0.16-0.57	0.28	0.12	0.45-6.24	1.70	1.10
Na($cmol_c Kg^{-1}$)	0.04-1.00	0.31	0.16	0.30-0.99	0.50	0.14	0.15-0.56	0.21	0.08
K($cmol_c Kg^{-1}$)	0.33-1.46	0.87	0.20	0.43-1.61	0.78	0.24	0.47-1.34	0.84	0.17
Al($cmol_c Kg^{-1}$)	0.01-11.07	1.13	1.49	0.29-7.66	4.31	2.05	0.02-0.31	0.14	0.06
%Al	0.1-77.2	22.8	22.2	12.9-80.5	64.3	20.1	0.2-6.5	2.1	1.65
CICe($cmol_c Kg^{-1}$	1.5-22.7	5.53	2.76	2.2-10.1	6.21	2.07	3.5-17.2	8.23	3.05

md = mediana; x = media; ds = desviación típica

Tabla 6: Propiedades químicas de los sedimentos terciarios de la cuenca de As Pontes: rangos, medias, y desviaciones típicas de distintos parámetros obtenidos en varios paquetes de estériles.

Paquete	pH	%S	CICe	Ca	Mg	Na	K	Al
	Med (min-max)	media			($cmol_c kg^{-1}$)	Med ± StdDev		
Q	4.9 (4.5-6.6)	0.014	3.79 ± 0.52	0.59 ± 0.21	0.45 ± 0.17	0.92 ± 0.11	1.40 ± 0.22	0.45 ± 0.31
Qϕ	7.2 (6.9-7.9)	0.022	21.24 ±9.10	14.60 ±7.13	4.08 ±± 1.73	0.66 ± 0.11	1.74 ± 0.26	0.16 ± 0.02
εϕ	4.3 (3.4-8.4)	0.056	8.90 ± 3.47	5.06 ± 3.04	2.21 ± 0.95	0.65 ± 0.58	0.73 ± 0.51	0.24 ± 0.24
εδ	4.1 (2.8-8.1)	0.041	5.84 ±2.24	3.61 ± 1.45	1.42 ± 0.66	0.23 ± 0.29	0.39 ± 0.26	0.20 ± 0.11
χδ	5.6 (4.5-7.8)	0.045	6.69 ± 1.16	3.36 ± 0.60	2.08 ± 0.61	0.41 ± 0.08	0.68 ± 0.16	0.15 ± 0.09
βδ	5.7 (5.1-7.7)	0.025	6.14 ± 1.83	3.39 ± 1.34	1.81 ± 0.72	0.40 ± 0.50	0.35 ± 0.25	0.19 ± 0.07
βχ	5.8 (5.4-6.8)	0.044	6.45 ± 0.97	4.16 ± 0.81	1.55 ± 0.28	0.22 ± 0.07	0.31 ± 0.23	0.21 ± 0.07
ββ	4.3 (3.8-6.7)	0.188	5.33 ± 1.77	2.85 ± 1.13	1.52 ± 0.81	0.26 ± 0.14	0.37 ± 0.17	0.31 ± 0.23
βPz	6.1 (4.9-8.3)	0.025	7.15 ± 2.91	4.31 ±1.71	1.72 ± 0.71	0.18 ± 0.08	0.33 ± 0.25	0.13 ± 0.07
αβ	4.9 (5.3-8.9)	0.029	9.14 ± 3.35	4.37 ± 1.88	2.94 ± 1.31	0.62 ± 0.49	0.98 ± 0.77	0.23 ± 0.19
αA	4.9 (2.9-7.1)	0.030	6.54 ± 2.61	3.14 ± 1.44	2.21 ± 0.86	0.42 ± 0.23	0.61 ± 0.42	0.17 ± 0.07
*αβ	5.5 (4.3-7.3)	0.514	8.98 ± 3.52	5.42 ± 2.51	2.22 ± 0.79	0.27 ± 0.09	0.22 ± 0.10	0.84 ± 1.30
*αA	4.9 (4.6-5.8)	0.980	10.34 ± 3.75	5.09 ± 2.44	3.24 ± 1.19	0.21 ± 0.04	0.29 ± 0.11	1.09 ± 2.42
*AB	3.3 (2.5-7.2)	0.697	8.05 ± 2.76	1.34 ± 1.16	4.21 ± 0.02	0.27 ± 0.08	0.42 ± 0.04	1.22 ± 1.62

* muestras con intercalaciones carbonosas

EL PROBLEMA: OXIDACIÓN Y ACIDIFICACIÓN

La oxidación de la pirita (1) es uno de los procesos naturales más acidificantes que se conocen en la superficie terrestre. Es un proceso complejo en el que están involucradas diferentes tipos de reacciones (oxidación-reducción, hidrólisis, complejación iónica, disolución-precipitación, etc.), y depende de muchos factores, tanto físico-químico como biológicos

$$4FeS_2(s) + 15O2 + 14\ H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3(s) + 8SO_4^{2-} + 16H^+ \qquad (1)$$

La presencia de pirita en los estériles origina dos de los problemas de más dificil solución en proceso de restauración: a) La formación de un **sustrato extremadamente ácido** para el desarrollo vegetal y b) La formación de **drenajes ácidos de mina**, que pueden acidificar y contaminar las aguas naturales.

La distribución de la pirita en los estériles de la mina de As Pontes es muy heterogénea. El contenido de azufre (la mayor parte pirítico, tabla 7) oscila ente <0.01 y >3·%, asociándose las mayores concentraciones a ciertos tramos del ordovícico y a arcillas carbonosas (tablas 5 y 6). Hemos constatado una **reactividad muy elevada** en la pirita de As Pontes (Fig. 6, Fig. 7), lo que unido al **bajo poder de neutralización** de los estériles (ausencia de carbonatos y minerales alterables,Fig. 8), un clima que favorece los procesos de oxidación y la eliminación de los productos y la presencia de ***Tiobacillus ferroxidans*** (bacteria catalizadora del proceso, Fig. 9), genera en muy poco tiempo **situaciones de extrema acidez** a partir de bajas concentraciones de pirita.

Tabla 7. Características de los estériles: pH, azufre total (S_T), pirítico (S_P), sulfato (S_S) y orgánico, pH de oxidación y acidificación neta potencial (NAP)

		Filitas del Ordovícico	Sedimentos Terciarios
PH_{H2O}	x ± std	5.3 ± 2.0	6.1 ± 1.4
	min – max	2.3 – 9.6	2.5 – 8.3
S_T (%, w/w)	x ± std	0.74 ± 0.69	0.26 ± 0.62
	min – max	<0.01 – 2.87	<0.01 – 3.24
S_P (% de S_T)	x ± std	89.1 ± 5.1	75.0 ± 10.0
	min – max	75 – 100	60 – 95
S_S (% de S_T)	x ± std	10.9 ± 7.5	1.5 ± 0.5
	min – max	<0.5 – 25	<0.5 – 5.2
S_O (% de S_T)	x ± std	<0.5	10.5 ± 5.2
	min – max	<0.5	5 – 35
PHox	x ± std	3.4 ± 1.6	4.7 ± 1.6
	min – max	1.6 – 6.1	1.6 – 6.2
NAP (Kg $CaCO_3$ t^{-1})	x ± std	18.6 ± 18.7	8.2 ± 16.1
	min – max	1.6 – 63.2	0.1 – 85.0

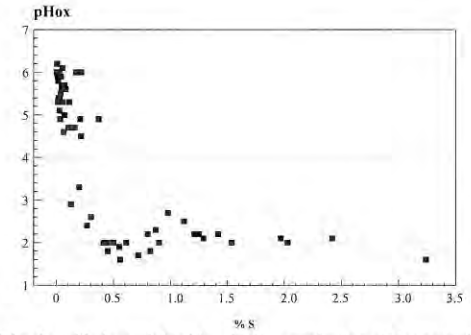


Fig.6: pH de oxidación de los estériles del yacimiento de As Pontes en función de su contenido de azufre total)

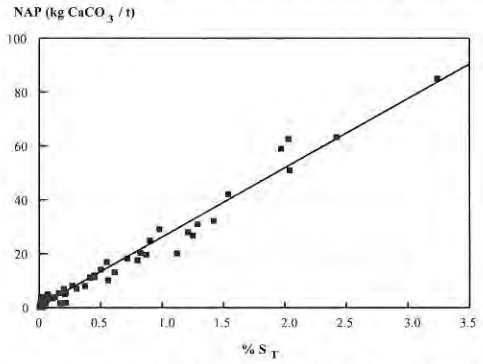


Fig. 7. Correlación entre la capacidad de acidificación potencial neta y el contenido de azufre total en los estériles.

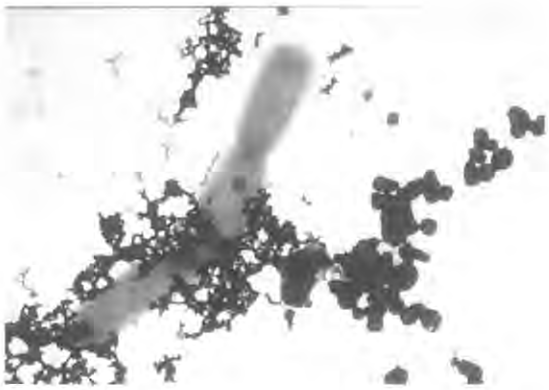


Fig. 9. Col onia de Thiubacilus ferrooxidans junto con óxidos de hierro en estériles de la mina de As Pontes.

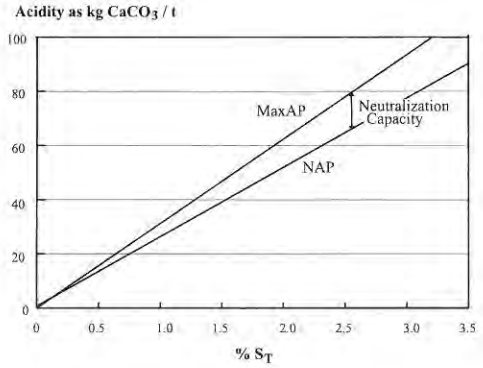


Fig. 8. Comparación de acidificación potencial máxima (MaxAP) y la Acidificación potencial neta (NAP)

LAS SOLUCIONES

Como respuesta a las numerosas limitaciones al establecimiento vegetal encontradas en las primeras etapas de la restauración de la escombrera, especialmente aquellas derivadas del desfase del inicio de la restauración y de la oxidación de la pirita, se adoptaron una serie de criterios de preparación y revegetación de las superficies finales:

1. **Recuperación de tierra vegetal** de las zonas de avance de la mina. Esta actuación sólo permitiría su uso en la mitad de la superficie de la escombrera

2. **Disposición selectiva de los estériles** en las superficies finales. Los criterios adoptados se basan fundamentalmente en las propiedades de los estériles de más difícil solución: el contenido pirítico y la granulometría. Los materiales con %S>0.2 (filitas de zonas de fracturación y arcillas carbonosas) se mantienen lejos de la superficie por su elevado potencial acidificante. Los sedimentos terciarios son, en general, adecuados para el crecimiento vegetal, cuando no tienen intercalaciones carbonosa, pero deban ser mezclados con materiales más gruesos (ej., filitas) mara mejorar sus texturas.

3. **Acondicionamiento de los sustratos** resultante para facilitar el establecimiento vegetal. En las superficies se ha visto que los niveles de azufre inferiores al 0.2% son aceptables para el sostenimiento de la vegetación; valores entre el 0.2 y 0.4% presentan problemas severos para el asentamiento vegetal, aún utilizando elevadas dosis de enmiendas calizas y los estériles con niveles de azufre superiores al 0.4% resultan inviables para la implantación de la vegetación aunque se apliquen elevadas cantidades de enmiendas básicas. El acondicionamiento del sustrato se realiza, por tanto, en función de la calidad de los materiales superficiales:

   a) Las superficies que presentan problemas de difícil solución mediante enmiendas correctoras (%S>0.4) se cubren con espesores variables de tierra vegetal en función del uso posterior y se encalan posteriormente con 3 t/ha de caliza.

   b) Las superficies de estériles con menos riesgo de acidificación potencial, se tratan con materiales correctores de la acidez y se utilizan como sustitutos de suelo. Como estrategia se ha establecido que los sustratos con %S<0.2 se encalan (<15 t $CaCO_3$/ha) y los sustratos con %S=0.2-0.4, se tratan con cenizas derivadas de la combustión de lignito.

LA REVEGETACIÓN

Tras el control de la acidez del sustrato, se procede a su **fertilización.** Se utiliza 50-60 U.F. de N, 150-160 U.F. de P y 110-120 U.F de K por hectárea como **abonado de fondo** y 40-50 U.F/ha de N **de cobertera**. El uso de **fertilizantes orgánicos** (gallinaza, lodos de depuradora,...) ha tenido excelentes resultados.

Independientemente del uso del suelo se realiza una **siembra inicial de especies pratenses** (*Holcus lanatus, Agrostis tennuis, Festuca arundinacea, Dactylis glomerata, Lolium perenne y Tripholium repens*), para obtener una cubrición vegetal rápida. Ocasionalmente se incorporan en la mezcla *Cytisus scoparius* y *Ulex europaeus.*

En las superficies en las que se ha fijado un **uso forestal**, principalmente en los taludes, se realiza posteriormente la plantación de arbolado. Se han plantado *Salix atrocinerea, Betula pubescens, Pinus ssp, Eucalyptus* .ssp, *Acacia melanoxilon, Robinia pseudoacacia, Psudosuga douglasii.* Es superficies específicas de la escombrera se han introducido *Castanea sativa* y *Querqus rubra.* Gran parte de la planta introducida es producida en las instalaciones de ENDESA.

En los años siguientes se realiza el seguimiento de las superficies restauradas y se evalúan los **limitantes para el desarrollo vegetal** encontrados en las superficies restauradas (Tabla 9). Como se aprecia, la calidad de las superficies ha mejorado manifiestamente desde que los criterios de selección de los estériles fueron introducidos en el plan de restauración.

Tabla 9.: Limitantes a la producción vegetal identificados en los suelos de la escombrera de la Mina Puentes en función del material utilizado en su construcción y el método de revegetación utilizado.

Material dominante	Fecha de construcción	Método de revegetación	Limitantes frecuentes
Arcilla Carbonosa	1976-1980	Cubrición con tierra vegetal	Baja profundidad efectiva, Hidromorfía en zonas llanas, Acidez extrema, Baja CICe, Carácter álico, Deficiencias de Ca, Mg, K, P, Fijación de fosfatos
Filitas con sulfuros	1980-1986	Cubrición con tierra vegetal	Baja profundidad efectiva, Acidez, Baja CICe, Deficiencia de Ca, Mg, K
Filitas libres de sulfuros	1986-1988	Revegetación directa	Deficiencia hídrica, Baja CICe, Deficiencia de K
Mezcla de materiales libres de sulfuros (filitas y sedimentos terciarios) y ceniza	1988-actualidad	Revegetación directa	Baja CICe, Deficiencia de K

ESCENARIOS GEOQUÍMICOS: FASES SECUNDARIAS, MOVILIZACIÓN DE METALES PESADOS

La **heterogeneidad** de los estériles y la variedad de técnicas de restauración, adoptadas en función de las situaciones de partida, ha dado lugar a la aparición de una gran variedad de **escenarios geoquímicos** en las superficies de la escombrera que han permitido estudiar numerosos procesos relacionados con la alteración/neoformación mineral y edafogénesis y con la movilización/inmovilización de metales pesados.

Variabilidad de las aguas de drenaje y precipitación de fases secundarias

La composición de las aguas está condicionada por el tipo de material que atraviesan y por el tiempo de contacto con él, siendo la oxidación de sulfuros y la hidrólisis acelerada de los minerales acompañantes los procesos que más contribuyen a su composición. La influencia de estos factores se ha visto reflejada en la amplia variación de las condiciones Eh-pH y concentraciones iónicas encontradas (Fig. 10). Las aguas de peor calidad, extremadamente ácidas, proceden de las áreas más antigüas de la escombrera, en la que son abudantes los sedimentos carbonosos ricos en pirita y con muy escaso potencial de neutralización de ácidos. Las aguas menos afectadas por la oxidación de sulfuros y mejor neutralizadas proceden de las áreas de más reciente construcción, en las que se ha aplicado criterios de selección de los estériles, habiéndose dejado en superficie pizarras de carácter alcalino y escasos contenidos de azufre. Esto demuestra que la gestión selectiva de los estériles es la práctica de restauración que mejor protección ofrece frente a la contaminación de aguas superficiales y subsuperficiales.

Variable	Media	Std Dev	Min.	Max.
pH	4.03	1.40	2.23	7.99
CE (mScm-1	3.15	1.25	0.82	6.51
Eh (mV)	547	147	143	754
SO_4^{2-} (mg l^{-1})	2602	1458	424	7404
Ca (mg l^{-1})	352.6	114.1	50.7	602.5
Mg (mg l^{-1})	140.0	70.6	14.6	370.0
Na (mg l^{-1})	18.2	6.6	4.6	53.2
K (mg l^{-1})	5.7	2.2	0.7	19.0
Si (mg l^{-1})	13.2	10.4	1.6	54.0
Al (mg l^{-1})	43.00	62.01	<0.05	450.00
Fe_t (mg l^{-1})	395.50	432.37	<0.01	1592.00
Mn (mg l^{-1})	49.62	30.47	1.30	148.70
Ni (mg l^{-1})	2.38	1.42	<0.01	8.60
Co (mg l^{-1})	2.09	1.24	<0.01	6.60
Zn (mg l^{-1})	3.18	2.95	<0.01	17.00
Cu (mg l^{-1})	0.33	0.55	<0.01	5.61
Pb (µg l^{-1})	2.8	5.2	<0.5	92.3
Cd (µg l^{-1})	16.3	22.1	<0.5	141.0

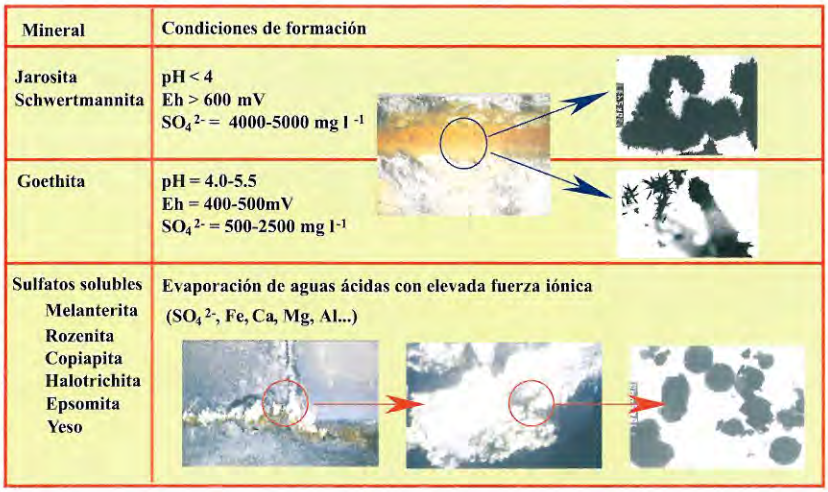


Fig. 10. Composición de las aguas de drenaje de la Mina de As Pontes y condiciones de formación de minerales secundarios formados por precipitación.

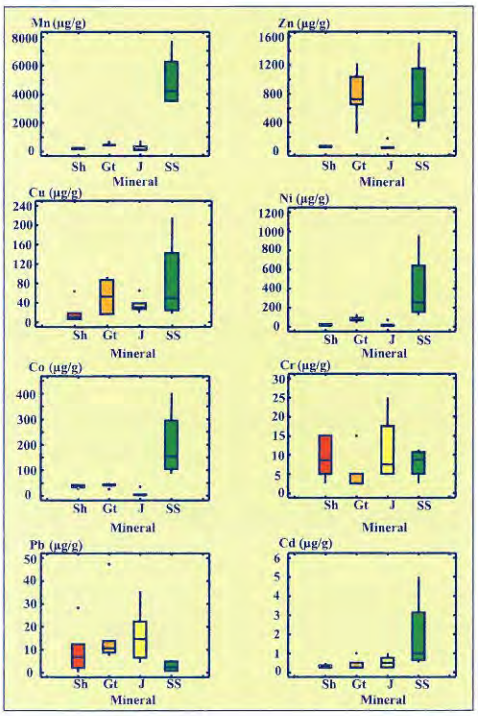


Fig. 11. Concentración de elementos traza en muestras de precipitados en función del mineral dominante: sulfatos solubles (SS), jarosita (J), shwertmannita (Sh), and goethite (Gt).

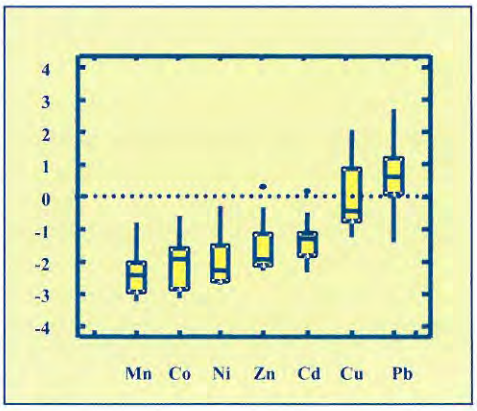


Fig. 12. Coeficientes de distribución (fases sólidas:agua) estimados para distintos elementos traza (Kd), rangos intercuartílicos para cada metal.

A partir de las aguas se forman **minerales secundarios ricos en Fe** que pueden estar involucrados en el control de la **solubilidad de algunos elementos traza**. El análisis de numerosas muestras de precipitados y de las aguas asociadas mostraron que la naturaleza mineralógica de los precipitados era diferente dependiendo del pH y composición de las aguas y de las condiciones de desecación temporales (Fig. 10)

Los **coeficientes de distribución** entre la fase sólida y la líquida para distintos metales mostraron el siguiente orden de movilidad : Mn>Co>Ni>Zn>Cd>Cu>Pb>Cr. La fase de sulfatos solubles es la que mayor cantidad de metales concentra. La schwertmannita adsobía pequeñas cantidades de estos cationes metálicos debido al bajo pH de las soluciones en las que se formaba y la goethita adsorbía cantidades significativas sólo de Zn. El Pb parecía estar fuertemente asociado a la jarosita y el Cr también era un metal relativamente inmóvil debido a su adsorción sobre la schwertmannita.

Uso de vermiculitas-test para el estudio de procesos geoquímicos de suelos de mina

El estudio *in situ* de una vermiculita pura, insertada en el suelo en bolsas permeables de poliamida permitió caracterizar los procesos de alteración y de intercambio iónico existentes en los suelos restaurados de la Mina Puentes (Galicia, NW España) y evaluar las prácticas de restauración. Los resultados mostraron una rápida modificación geoquímica y mineralógica de la vermiculita después de períodos de tiempo cortos (3 meses). Las modificaciones más importantes se produjeron en los suelos con estériles ricos en sulfuros, en los que la vermiculita sufrió una drástica reducción de la CIC (descensos de hasta el 87 %) provocada por una fuerte aluminización de su espacio interlaminar, propia de medios ácidos no complejantes (Fig. 13)

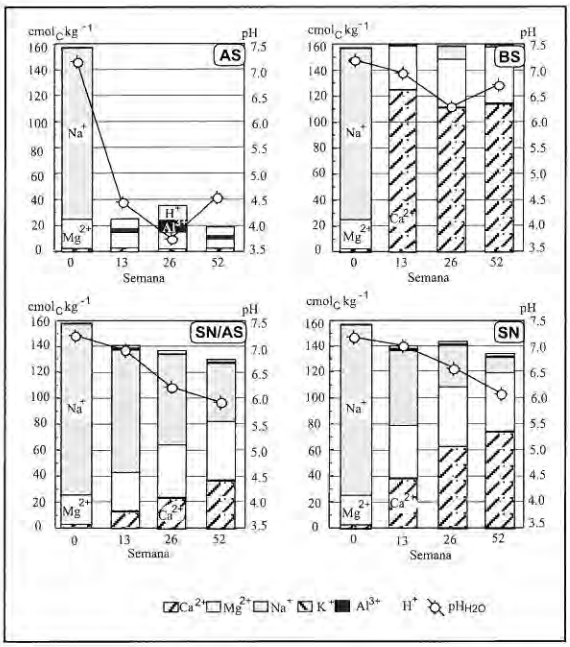


Figura 13. Evolution temporal del pH H2O, cationes de cambio y CICe de vermiculitas-test enterradas en distintos suelos restaurados de la escombrera y un suelo natural de la zona (SN=suelos naturales, suelos de esombrera AS=ricos en sufuro, BS=bajos en sulfuro, SN/AS=ricos en sulfuro con una capa de tierra vegetal) (Monterroso y Macías 1999)

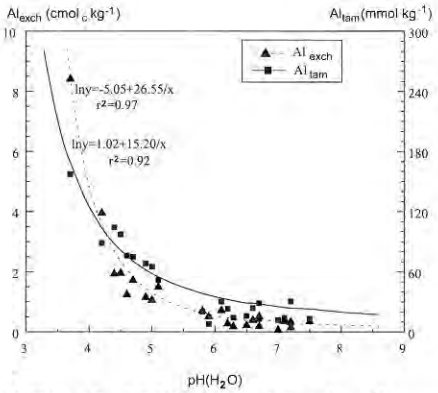


Figure 14. Variación del Al de cambio (Al exch) y Al interlaminar (Al_{tam}) en función del H_{H2O} en las vermiculitas enterradas.

Procesos edafogeoquímicos

A partir dela **composición de las fases fluidas y la aplicación de diagramas de estabilidad mineral** se realizó una caracterización global de los ambientes de alteración y edafogénesis generados en la superficie de la escombrera y de las tendencias evolutivas de cada sistema. La presencia de sulfuros es el factor litológico que condiciona la estabilidad y tendencias de neoformación mineral en estos medios. Los medios con mayor contenido de sulfuros (pH<4) provoca una tendencia a la destrucción total de los minerales primarios e inhibe los procesos de neoformación mineral. En el extremo opuesto se sitúan los ambientes generados por los materiales libres de sulfuros y mezclas con cenizas, de caracter en torno a la neutralidad en los que la alteración mineral es escasa y se producen condiciones de neoformación de minerales tipo caolinita e, incluso, 2:1 (Fig. 15, Tabla 9).

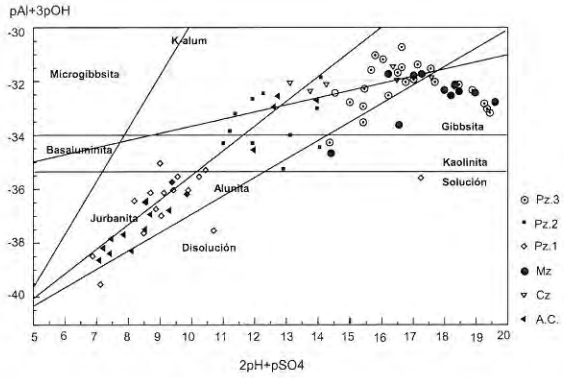


Fig. 15: Valores de $pAl^{3+}+3pOH$ vs $2pH+pSO_4^{2-}$ en las disoluciones de los suelos de la escombrera de la Mina Puentes respecto a la solubilidad de diferentes minerales según van Breemen (1973) (pH_4SiO_4=2.7) (Monterroso et al., 1998)

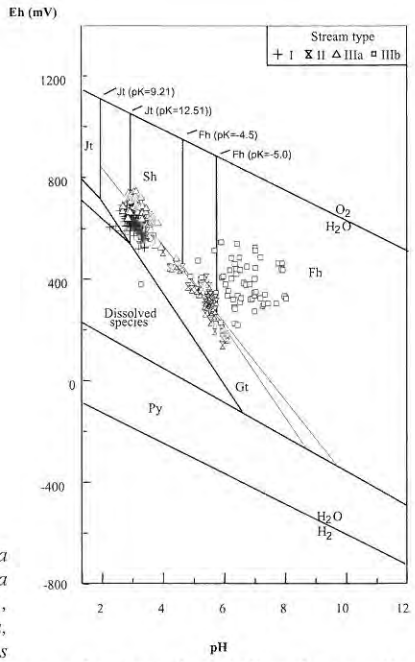


Fig. 16:Localización de distintos tipos deagua de la escombrera en un diagrama Eh-ph para el sistema Fe-S-K-O-H según Bigham et al., 1996; Jt=K-jarosita, Sh=shwertmannita, Fh=ferrhydrita, Gt=goethita, Py=pyrita. Los campos de metaestabilidad, están marcados conpuntos. Las áreas claras indican, la expansión de los campos de Fh y Jt si se consideran valores de pK mas bajos.

Tabla 9. Síntesis de las tendencias de evolución en los medios de alteración generados en las superficies de la escombrera de la mina Puentes según el material original dominante:arcilla carbonosa (AC), pizarra con niveles altos, medios y bajos de sulfuros (Pz1, Pz2, Pz3), ceniza (Cz) y Mezcla (Mz) (Monterroso et al. 1998).

Material	AC, Pz.1	Pz.2	Pz.3, Cz, Mz
pH disolución	<4.0	4.0-5.5	>5.5
Estabilidad de sulfuros	Inestable	Inestable	Inestable
Mecanismo de oxidación	Fe^{3+}, *T. Ferrooxidans*	O_2	O_2
Mecanismo de alteración	Acidolisis fuerte	Acidolisis moderada	Hidrólisis
Alteración minerales primarios	Total	Parcial	Incipiente
Evolución de minerales 2:1	Destrucción	Degradación intensa Aluminización	Degradación/ Neoformación
Neoformación de minerales secundarios	Escasa: Sulfatos de Fe, Al Sílice amorfa Schwertmanita	Escasa: Sulfatos de Al Minerales 1:1 desordenados Goethita	Caolinita/Minerales 2:1
Proceso edafogeoquímico	Sulfatación	Aluminosialitiación	Monosialitización/ Bisialitización

ENSAYOS DE PRODUCCION DE BIOMASA Y FIJACION DE CARBONO

Se han ensayado los rendimientos obtenidos para la producción de biomasa y fijación de C en suelos de la escombrera de la mina Puentes y en suelos del entorno. Las especies seleccionada fueron *Eucaliptus globulus, Acacia Melanoxilum, Acacia dealbata, Cytisus* y *Ulex europeus* con diferentes marcos de plantación. Los resultados a los 30 meses de la plantación se encuentran en las figs. 17 a 20.

Destacan los valores de producción y fijación del eucalipto cuando se plantan en parcelas de elevada densidad (0.5 x 1m) en los que se obtienen valores para los suelos naturales de 19.6 tC/ha/a en suelos de las escombreras y de 22.5 tC/ha/a en los suelos del entorno de la mina. Los factores de multiplicación respecto a los valores medios de la zona norte son de 2.5 y 2.8 debiendo indicarse que estos son los primeros resultados y es de esperar que en sucesivas siegas cada 2 ó 3 años (según se establezca que resulta más adecuado) puedan obtenerse resultados más elevados. Además, el marco de plantación más denso es el que incrementa más rápidamente el bajísimo nivel inicial de materia orgánica existente en los suelos en los que se ha obtenido una fijación anual media extraordinariamente elevada (40tC/ha/a) para los 2.5 años de período estudiado.

Fig. 17 Producción total de materia seca

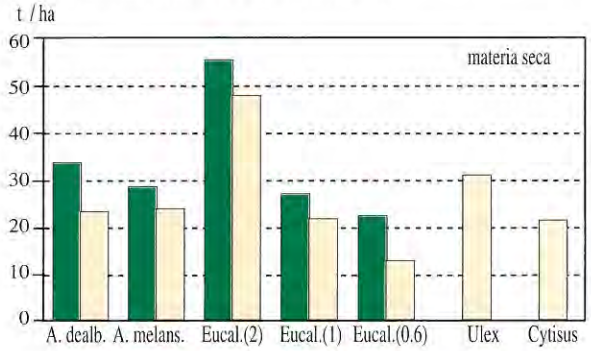


Fig. 18. Producción energética total

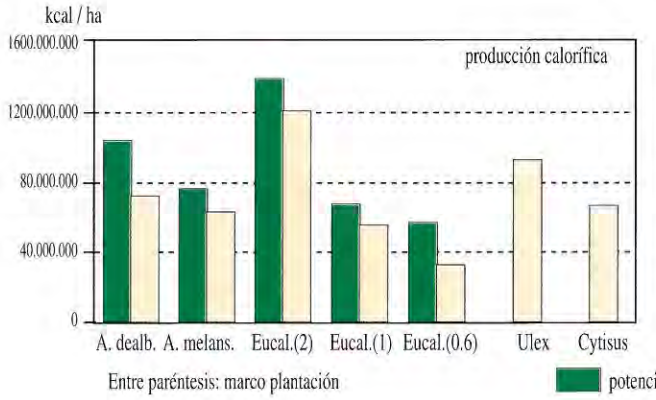


Fig. 19. Balance de carbono en el suelo después de 30 meses de plantación

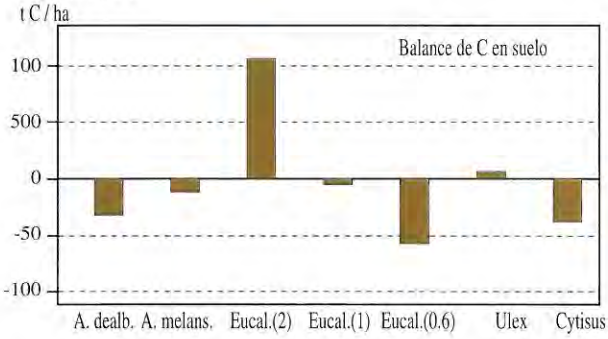
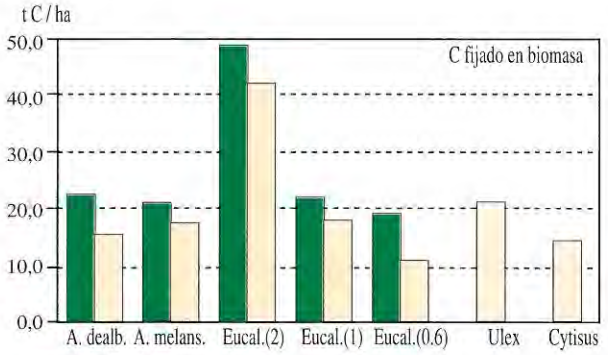


Fig. 20. Carbono fiado en biomasa después de 30 meses de plantación



Con estas cifras de producción y aún considerando el enriquecimiento medio anual de C en el suelo obtenido en diferentes tipos de suelos de Galicia (0.5tC/ha/a) serían necesarias 116.114 ha (3.9% de Galicia) de eucaliptales en suelos pobres como los de la escombrera de mina o 106.522 ha en suelos del entorno de As Pontes (3.6%) para fijar todo el carbono emitido por la Central Térmica de As Pontes.

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

Distribución geográfica y cronología de las turberas de Galicia

A. Martínez Cortizas, X. Pontevedra Pombal
J.C. Nóvoa Muñoz y E. García-Rodeja

DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA

El área a la que se hace referencia en este artículo está situada entre 41° 30' y 43° 36' de latitud N y 6° 44' y 9° 18' de longitud W (Figura 2.1). El paisaje dominante se caracteriza por una topografía colinada. En el sector septentrional la altitud máxima es de 1.050 m –pico Cadramón- y la mayor parte de las tierras altas están entre los 700 y los 900 m sobre el nivel de mar. Los sectores meridionales y orientales constituyen el límite occidental de la Cordillera Cantábrica y en ellos las montañas alcanzan mayor elevación. En este sector Pena Trevinca, con 2.124 m, es el punto culminante.

Figura 2.1. Principales sistemas montañosos de Galicia.

La formación más extensa de turberas se encuentra en el sector norte (Figura 2.2), donde se ve favorecida por una precipitación estival relativamente alta, pero sobre todo por la baja estacionalidad pluviométrica y las abundantes nieblas. Sólo en este sector se han desarrollado durante el Holoceno turberas ombrotróficas de cobertor. Las minerotróficas son también representativas de otros sectores y de las depresiones terciarias

Figura 2.2. Principales sectores de turberas de montaña de Galicia.

Aunque en los trabajos realizados se han aplicado diversas definiciones a las turberas existentes en Galicia, pocos describen con precisión su naturaleza. Recientemente Pontevedra Pombal (1995), Pontevedra Pombal *et al.* (1996a) y Ramil *et al.* (1996c) han tratado de cubrir este vacío mediante una revisión de las diferentes definiciones, proponiendo clasificaciones basadas en la hidrología, la geomorfología y la vegetación.

Desde el punto de vista hidrológico, las turberas minerotróficas y ombrotróficas son comunes en el noroeste de la Península Ibérica. Las turberas de cobertor (*blanket bogs*) aparecen únicamente en las superficies planas de las cimas de las montañas del sector norte, desarrollándose directamente sobre el sustrato rocoso, sobre depósitos periglaciares pedregosos o sobre suelos muy escasamente evolucionados; sólo ocasionalmente lo hacen sobre los frecuentes suelos podsólicos existentes en el área. Esto coincide con lo propuesto por Dimbleby (1965) y Moore (1975) para quienes las turberas de cobertor no constituyen necesariamente el estado final de desarrollo de los suelos en áreas de alta precipitación, debido a la formación de costras de impermeabilización, como habían sugerido Taylor & Smith (1972), sino que pueden ser consecuencia de cambios en el suelo ligados a la eliminación de la cubierta arbórea, lixiviado, pérdida de nutrientes y el desarrollo de una vegetación acidófila (Moore, 1975).

Las turberas minerotróficas (*fens*) están ampliamente representadas. Las más antiguas se localizan en las montañas orientales y surorientales, en posiciones topográficas generadas por la actividad de los glaciares. Se forman en depresiones de sobreexcavación, en depresiones intramorrénicas y en áreas morrénicas. En el sector norte este tipo de turberas ocupan amplias depresiones, que alcanzan superficies de hasta 55 ha, formadas por la alteración y erosión de los granitos (turberas de alveolo de alteración). También se encuentran en pequeñas depresiones terciarias en los sectores central y meridional. La progresiva acumulación de materia orgánica hace que algunas de estas turberas evolucionen hacia turberas elevadas (*raised bogs*), desarrollando un nivel superior ombrotrófico de espesor variable. Los depósitos basales son de naturaleza muy heterogénea: sedimentos glaciares, fluvioglaciares, periglaciares, terciarios, coluvio-aluviales y suelos con muy diverso grado de evolución. En algunas localidades costeras existen paleoturberas formadas en antiguos lagos litorales, en ocasiones cubiertas por aparatos dunares (p.ej. Corrubedo, A Coruña), que se formaron en momentos más fríos del Cuaternario y con niveles marinos por debajo del actual.

Por último, algunas turberas se localizan en laderas, irradiando a partir de formaciones ombrotróficas o bien se desarrollan sobre depósitos con abundantes piedras o cantos (de origen periglaciar). No es infrecuente que los depósitos basales presenten un exceso de agua. En lugares donde la capa freática alcanza la superficie, también pueden darse movimientos de reptación (creep), que tienen como consecuencia el desarrollo de profundas grietas y de deslizamientos que dejan abiertos frentes naturales de turba de hasta 3 metros de espesor.

CRONOLOGÍA DE LAS TURBERAS

Las edades basales revelan que la acumulación de materia orgánica en las turberas minerotróficas (fens) de los sectores orientales y surorientales comenzó, de forma generalizada, entre hace 10.000 y 11.000 años BP. Se trata de los sectores de mayor altitud que fueron intensamente sometidos a la actividad glaciar durante las fases frías del Cuaternario (Pérez Alberti & Covelo, 1996; Kossel, 1996; Valcárcel, 1996, 1999). La fase inicial de acumulación de materia orgánica se relaciona con el aumento de los flujos de humedad durante la etapa final de fusión del hielo y el retroceso de los glaciares de montaña. Recientes dataciones radiocarbónicas llevadas a cabo en las arcillas basales ricas en materia orgánica de la laguna de Lucenza –ubicada en la sierra de Courel-, dieron una edad de 17.300-17.400 años BP, lo que sugiere una inmediata puesta en marcha de los procesos de colmatación tras el último máximo glaciar (ocurrido entre el 20.000 y el 18.000 BP).

En el sector septentrional el comienzo del desarrollo de las turberas de cobertor (blanket bogs) y las elevadas (raised bogs) tuvo lugar, al menos, entre hace 8.000 y 9.000 años BP. La mayor parte de las turberas minerotróficas iniciaron su formación en dos episodios principales, uno en torno a los 5.000 - 4.000 años BP y el otro entre 3.000 y 2.000 años BP, aunque hay unidades más recientes. Numerosos autores han relacionado el comienzo de la formación de algunas turberas con actividades antrópicas como el aclarado de los bosques por talas o incendios (Moore, 1975, 1986, 1988; Chambers, 1988). A partir de análisis polínicos hechos en turberas, existen evidencias de regresión de los bosques en el norte peninsular (Ramil, 1993; Rochette *et al.*, 1991; Van der Brink & Janssen, 1985; Törnqvist & Joosten, 1988; Törnqvist *et al.*, 1989; Janssen, 1994, van der Knaap & van Leewen, 1994, 1995) que coinciden con un aumento en la acumulación de materiales inorgánicos en la turba; asimismo algunos estudios sobre erosión de suelos y trabajos que integran estudios arqueológicos, de evolución del paisaje y de evolución de los suelos durante el Cuaternario (Benito *et al.*, 1991; Rochette, 1992; Martínez Cortizas *et al.*, 1993; Martínez Cortizas & Moares, 1995; Martínez Cortizas, 1996), ofrecen evidencias de que las fases erosivas fueron sincrónicas con el desarrollo de las culturas humanas (Epipaleolítica, Neolítica y edades del Bronce y del Hierro) y coinciden con la activación de la acumulación de turba en turberas minerotróficas, tal vez como resultado de un aumento del flujo de agua superficial.

Factores que influyen en la formación de las turberas

A. Martínez Cortizas

INTRODUCCIÓN

Las turberas son ecosistemas húmedos (humedales) formados por turba y que poseen una vegetación actual formadora de turba, lo cual las diferencia de áreas en las cuales hay vegetación potencialmente formadora de turba pero que no vive sobre un sustrato exlusivamente orgánico. Para que se produzca la acumulación de turba, los restos vegetales deben sufrir una lenta descomposición, y para ello han de darse una serie de procesos en el medio que favorezcan el desequilibrio entre la acumulación de restos vegetales y su descomposición por los microorganismos. En ambientes con escasa disponibilidad de oxígeno -medios anóxicos-, temporal o permanentemente encharcados, se dan estas condiciones, a veces ayudadas por bajas temperaturas y elevadas precipitaciones.

Así pues, las turberas son ambientes altamente especializados, de origen enteramente vegetal, creados por el crecimiento contínuo de las plantas que conforman su superficie y la acumulación de sus restos en forma de turba durante milenios. En general la turba posee proporciones muy bajas de materia inorgánica (menor de un 5%) si bien en algunos casos –turbas minerotróficas- la proporción puede llegar a ser mucho mayor que la de aquellas cuya única fuente de inorgánicos es la deposición atmosférica -turba ombrotrófica-

En este capítulo se hace una breve descripción de los principales factores que influyen en la formación y pervivencia de las turberas de Galicia, excluyendo la actividad humana –la cual será tratada en el capítulo dedicado al estado de conservación presente pues, desgraciadamente, en la actualidad son más los procesos de degradación directa o inducida que las acciones de conservación -. Debe servir de síntesis de los tres capítulos siguientes, tal vez mas adecuados para especialistas que para personas interesadas en acercarse a los ecosistemas de turbera pero que no poseen conocimientos profundos.

EL RELIEVE Y SU EVOLUCIÓN

Las turberas no sólo ocupan unos determinados espacios geográficos en el noroeste peninsular, si no que la tipología de las mismas se encuentra en buena medida ligada a las formas del relieve de estos espacios. Por ejemplo, las grandes extensiones de turba que cubren posiciones diversas, de cumbre, ladera, collado, escalón, etc..., son exclusivas de las sierras septentrionales gallegas. Estas formaciones singulares y excepcionales a la latitud que aparecen, deben su presencia a una combinación de factores donde la evolución cuaternaria de las formas del relieve ha desempeñado un papel relevante.

Los coletazos fríos de la última glaciación dieron lugar en las sierras septentrionales (Xistral, Buio, Toxiza, ...) a una cohorte de formaciones sedimentarias que regularizaron tanto las cumbres como las laderas, con depósitos de clastos -tal como ocurre de forma extensiva en el área de la cuarcita del Xistral. Estas formas suaves fueron propicias a la colonización vegetal, en cuanto las condiciones climáticas mejoraron para dar paso al Holoceno. Sin embargo, las condiciones todavía frías de los inicios ligadas a sustratos litológicos muy pobres en nutrientes, debieron ser altamente selectivos para las especies colonizadoras. El pobre estado nutricional, un aumento del flujo de humedad y la resistencia a la degradación de los restos vegetales de dichas especies favorecieron la acumulación de restos orgánicos, dando lugar a la formación incipiente de turba (paludificación).

A partir de superficies tanto planas como de pequeñas depresiones en las cumbres, las turberas comenzaron a aumentar en espesor y a extenderse lateralmente irradiando en todas las direcciones posibles, para formar mantos contínuos hidrológicamente conectados. Esta expansión se vió favorecida, con toda probabilidad, por otro aspecto que todavía mantiene su vigencia en el presente, el intenso gradiente termopluviométrico –de aumento de la precipitación y descenso de la temperatura con la altitud-, unido a un fuerte desnivel altitudinal y a la cercanía del océano.

No obstante, en muchas áreas deprimidas las condiciones favorables para la acumulación de turba precedieron a la mejoría que marcó el inicio del Holoceno. Los procesos ligados a los ambientes glaciares de las sierras interiores (Ancares, Trevinca, Manzaneda) originaron toda una serie de formas erosivas y sedimentarias, que propiciaron la aparición de numerosos enclaves de forma cóncava. Al actuar las depresiones como zonas de reservorio de agua debido a la presencia de sedimentos basales arcillosos, las turbas minerotróficas empezaron a formarse por colmatación de lagunas y otros cuerpos de agua someros (terrestrización), con seguridad en las sierras orientales y sudorientales desde hace al menos 17.000 años y, tal como sugieren investigaciones recientes, también en las septentrionales aunque en fechas tal vez posteriores.

Así pues las formas preexistentes del relieve, modeladas a otras escalas temporales –incluso de millones de años, como en el caso de los alveolos graníticos-, también fueron decisivas para la diversidad de formaciones turbófilas que pueden encontrarse hoy en las áreas de montaña de Galicia.

EL CLIMA PRESENTE Y PASADO

Las turberas se desarrollan y sobreviven debido a que tienen un balance hídrico positivo, es decir, las pérdidas de agua -por drenaje, evaporación y transpiración- son compensadas o superadas por las entradas -precipitación, escorrentía y nivel freático-. Para las turberas ombrotróficas este balance es más crítico, pues las entradas están representadas exclusivamente por el agua procedente de la precipitación. De hecho, algunos autores han sugerido que existe un límite mínimo de aportación pluviométrica para que pueda formarse una turbera ombrotrófica. Por ejemplo, Wickman (1951) demostró que en ciertas turberas del norte y centro de Europa la cantidad de lluvia controla estrechamente la forma, e indica que se requiere una precipitación anual mínima de 475 mm.

Para Lyndsay (1995) la precipitación total acumulada no es una medida adecuada cuando se considera el desarrollo y supervivencia de los sistemas de turbera. La regularidad en el suministro de agua parece ser el factor más importante en su

desarrollo. Backéus (1988) demostró que la distribución de la precipitación y las condiciones de humedad durante cualquier periodo de tiempo tienen mayor peso para el crecimiento de los esfagnos. Por ello, a escala global las turberas no suelen aparecer en latitudes que sufren largas sequías, o en las regiones de bajas precipitaciones tanto de las latitudes bajas como elevadas. Este último autor también ha sugerido que la temperatura es un factor secundario en el crecimiento de los esfagnos y diversos investigadores han empleado criterios climáticos en la identificación de áreas de turbera y para la caracterización de las formas superficiales (por ejemplo, Lyndsay *et al.*, 1985, 1988)

En Galicia, existe un marcado contraste norte-sur en el reparto de la precipitación o estacionalidad pluviométrica, que es sólo interferido parcialmente por las elevaciones montañosas –en las que tiende a disminuir la estacionalidad- (Martínez Cortizas & Pérez Alberti, 1999). El tercio meridional se encuentra sujeto a una fuerte estacionalidad pluviométrica, poco propicia para la formación y pervivencia de ecosistemas de turbera, a excepción de las zonas cóncavas en las cuales se da un encharcamiento temporal o permanente debido a la escorrentía o al ascenso freático; por el contrario, en las sierras septentrionales la estacionalidad pluviométrica es poco marcada, siendo éstos ambientes más favorables para las turberas. Tal vez sea este el motivo por el cual las turberas de cobertor -las más sensibles al balance de agua- tan sólo se encuentran en este sector; mientras que las minerotróficas están presentes en una mayor gama de ambientes climáticos, incluidos los sectores meridionales.

No obsante, crecimiento de vegetación formadora de turba y acumulación de turba son dos cosas bien distintas. Como ya se ha mencionado, la acumulación de turba es el resultado de un balance descompensado entre producción y descomposición de restos orgánicos. Aunque la acumulación anual de turba raramente excede el 10% de la producción anual, en este balance la temperatura es sin duda un factor importante al afectar tanto a la evapotranspiración -interviniendo en la duración de las condiciones anóxicas-, como a la producción y descomposición de los restos vegetales.

Un aspecto sobre el que debe llamarse la atención es que la distribución actual de los hábitats de turbera es el resultado de numerosos factores que han operado a diversas escalas espaciales y temporales -cambios climáticos del Cuaternario final, formaciones superficiales y formas del relieve, actividad humana, etc...-. Por ello, el clima actual no debe tomarse como criterio exclusivo en el estudio de la distribución y caracterización de las áreas de turbera de Galicia. A escalas cortas de tiempo el clima debe verse como un factor que influye en la pervivencia y posible evolución futura. Si embargo, las actividades humanas pueden tener un impacto mucho mayor en el devenir de estos ecosistemas.

LA VEGETACIÓN

Las formaciones de turbera que se pueden encontrar en Galicia se caracterizan por un paisaje abierto dominado por una vegetación en la que son típicas las formas de bajo crecimiento. Musgos (*Sphagnum*), ciperáceas (*Eriophorum* y *Carex*), juncáceas (*Juncus*), plantas especializadas (*Drosera* o *Pinguicula*) y pequeños arbustos (principalmente del género *Erica*) forman la mayor parte de la cubierta vegetal, y es infrecuente encontrar especies que alcance más de 50 cm de altura. Al igual que en otras áreas de Europa, en casi todos los casos en los que están presentes herbáceas altas o árboles, puede atribuirse a alguna forma de perturbación (repoblación, transformación a pastizales, etc...). Sin embargo, en la Europa continental una gran proporción de las turberas, con por ejemplo la turbera elevada de Etang de la Gruere (Jura, Suiza), están arboladas de forma natural, y los árboles tienen una influencia profunda en su microclima (Geiger, 1965; Eurola, 1975; Moore, 1984). Las copas de los árboles captan el agua, que se evapora directamente desde las hojas, y hasta un un 30% de la lluvia puede no llegar a alcanzar nunca la superficie de la turbera (Hornung y Newson, 1986; en Lyndsay, 1995). Por el contrario, en las formaciones de turbera abiertas estas pérdidas no se dan a no ser que se haya desarrollado una densa cobertura de arbustos.

A pesar de haberse determinado hasta 182 especies vegetales distintas (133 de plantas vascualres, 46 de briófitos y 3 de líquenes), las turberas galaicas son ecosistemas bastante pobres en especies, muy en particular las de naturaleza ombrotrófica. Tan sólo unas 40 de las especies catalogadas pueden ser consideradas como principales componentes de la cubierta vegetal y, además, la mayoría de las presentes aparecen también en muchos otros tipos de hábitats.

Según Hulme (1979), la vegetación sólo es una parte de los ecosistemas de turbera, la superficie actual es como la última página de un libro, donde permanecen registrados los procesos e influencias que actúan sobre y con el ecosistema durante su desarrollo. Así, por ejemplo, estudios realizados en las Islas Británicas, han demostrado que algunas de las especies que dominaron en una turbera durante miles de años desaparecieron por completo de la vegetación superficial en el último milenio, como es el caso de la sustitución de *S. imbricatum* por *S. magellanicum* (Barber, 1993; Barber *et al.*, 1998; Mauquoy & Barber, 1999a,b; Hughes *et al.*, 2000).

Por otro ldo, las comunidades vegetales superficiales no están aisladas sino que están mantenidas por y dependen de las comunidades precedentes. Una turbera aparentemente simple es una entidad con una dinámica extremadamente compleja.

Aún así, la cubierta vegetal y muy en particular la abundancia de especies de esfagnos, es de importancia crítica para el desarrollo de la turbera. Esto se debe a que no sólo contribuye a la formación de la turba, interviniendo en la forma global del depósito turboso y en sus rasgos superficiales, sino también a la acumulación de agua y mantenimiento de las condiciones anóxicas y al desarrollo de una fuerte acidez en las fases sólida y líquida.

Según Wheeler y Shaw (1995) el estudio de algunas de las principales características de las especies típicas de las turberas permiten establecer los siguientes aspectos generales:

- En su mayor parte son de distribución amplia
- raramente son específicas de las turberas
- la mayoría son perennes
- hay pocas evidencias de que las semillas y las esporas sean importantes en el mantenimiento de las poblaciones en las turberas no perturbadas
- las semillas de muchas de las especies son ligeras y se dispersan fácilmente
- en general son especies de crecimiento relativamente lento

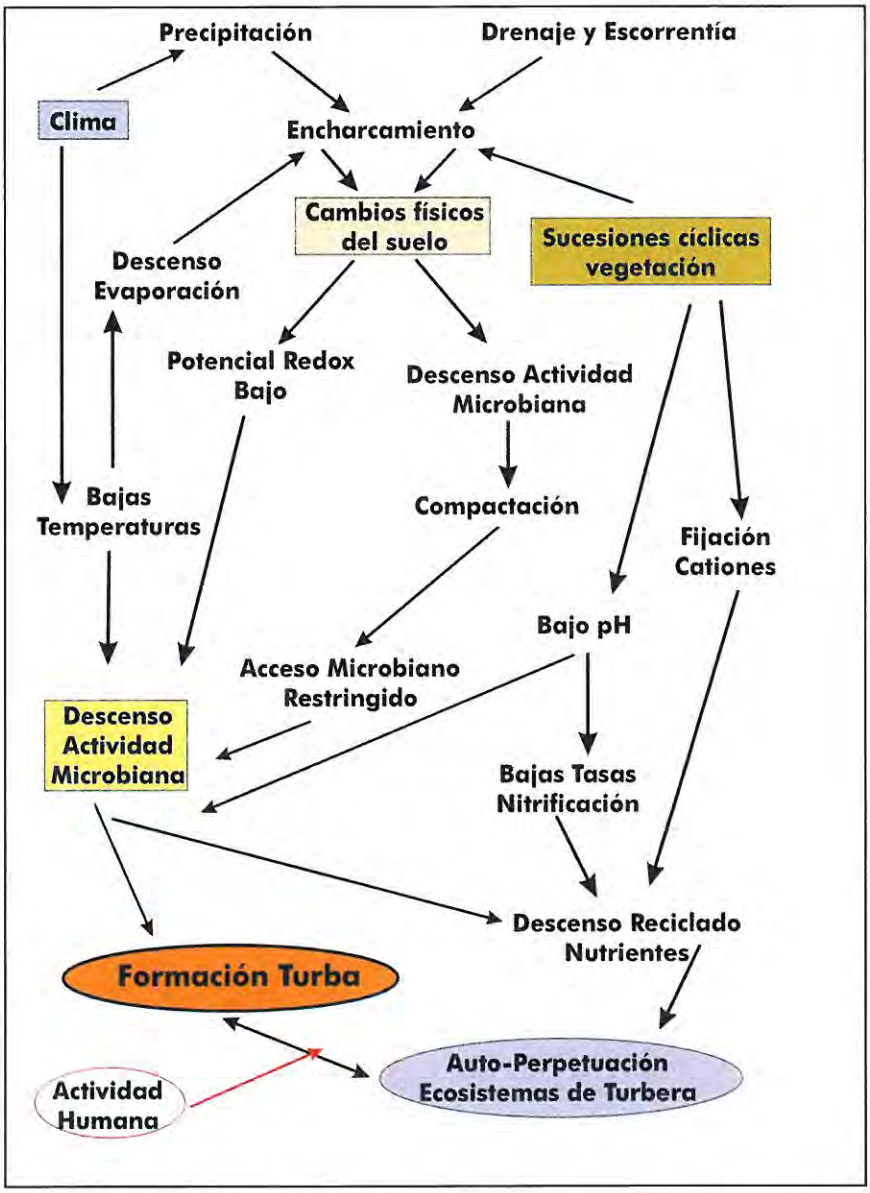


Figura 3.1. Esquema de las complejas relaciones que se establecen entre los factores que controlan la formación de la turba.

- son eficaces en la absorción de nutrientes a partir de disoluciones acuosas muy diluidas
- muchas poseen mecanismos internos para la conservación de los nutrientes
- cuando se dan condiciones ombrotróficas éstas suelen ser sub-óptimas para el crecimiento vegetal.

En síntesis, se podría concluir que a la acción directa de las condiciones climáticas, pretéritas y presentes, en su formación y previvenvia, la presencia actual de turberas en el NW ibérico responde también a la existencia de un modelado que es herencia tanto de los procesos de intensa meteorización ocurridos bajo los climas cálidos del Terciario, como a los procesos de gelifracción, regularización de superficies, sobreexcavación y obturación desencadenados por los procesos ocurridos bajo los climas fríos del Cuaternario.

Cabría mencionar también, auque sea brevemente, que en época holocena la acción humana favoreció la formación de áreas hidromorfas y el disparo de la terrestrización, al potenciar una posición más superficial de la capa freática, como consecuencia de la deforestación, la erosión de los suelos y el aumento de la escorrentía superficial. Esta tendencia se está invirtiendo en la actualidad, pues una buena parte de las acciones humanas llevadas a cabo en los medios turbosos y otros humedales, representan serios riesgos para su supervivenvia, cuando no la han afectado ya de forma irreversible.

Composición y propiedades de las turberas de Galicia

X. Pontevedra Pombal, J.C. Nóvoa Muñoz, E. García-Rodeja Gayoso y A. Martínez Cortizas

TASAS DE ACUMULACIÓN DE TURBA

El espesor máximo medio en las turberas minerotróficas es de 2-3 m, si bien en los sectores orientales y surorientales (p.ej. Lucenza, Lugo) algunas alcanzan profundidades elevadas (7-8 m); pero en estos depósitos no todos los niveles son de turba. Las turberas ombrotróficas tienen profundidades máximas superiores a 5 m (se han realizado algunos sondeos en los que localmente se superan los 7 m, aunque también es probable que se trate de formaciones mixtas, ombrotrófico/ minerotróficas), pudiéndose considerar representativa una media de 3 m. La Figura 8.1 muestra la relación entre la edad y la profundidad para turberas de diferentes sectores del noroeste de la Península Ibérica; algunos datos han sido tomados de la bibliografía (Fernández & Ramil, 1995). La mayoría de los puntos se ajustan a una función de regresión con un coeficiente de correlación de r= 0.98 (n= 55) y una pendiente de 21. Así pues, la acumulación media de turba durante el Holoceno ha sido de 1 cm por cada 20-25 años. Del resto de las turberas, una buena parte se ajusta a una función de pendiente no significativamente distinta (b= 23; r= 0.88, n=15) -reflejando la misma tasa media de acumulación-, pero que intercepta el eje de abcisas en una edad de 4.100 BP. Esto sugiere la presencia de una discontinuidad en la acumulación que, a juzgar por las fechas mínimas, debió haber ocurrido entre hace 4.000 y 6.000 años BP y tener una amplia repercusión temporal y espacial en el territorio galaico (incluye turberas de varios sectores). Para algunos de estos casos se ha comprobado la existencia de niveles erosivos y fuerte compactación en las turberas.

A partir de las dataciones radiocarbónicas disponibles se han calculado las tasas medias de acumulación, expresadas como espesor de turba (mm $año^{-1}$) o como masa. En la mayor parte de las turberas estudiadas se dispuso únicamente de la edad basal, por lo que sólo se pudo estimar una tasa media de acumulación; en unas pocas, con dos o más dataciones, se pudieron realizar reconstrucciones más detalladas. Las tasas de crecimiento expresadas como espesor son fáciles de calcular si se conoce la edad basal y la profundidad total de la turbera, pero para el cálculo de las tasas de acumulación de masa es necesario disponer de datos directos de producción o realizar estimaciones indirectas. Aquí utilizamos esta última aproximación mediante el modelo propuesto por Clymo (1983, 1984). Este modelo requiere también una tasa de descomposición -a, fracción de descomposición de la masa total del catotelm, que continua liberando CO_2 y CH_4 de forma anaerobia y muy lentamente (Gorham, 1991)- que puede obtenerse por iteración a partir de tres profundidades y sus correspondientes edades (Clymo, 1983). De esta manera se obtuvieron valores entre 4.5 - 5.0 x 10^{-4} , mayores que los dados por Clymo (1983) por ejemplo para Drave Mose (2 x 10^{-4}) y que los asumidos por Gorham (1991) para turberas subárticas y boreales (1.4 x 10^{-4}), pero del mismo orden que los estimados para una turbera ombrotrófica en Moor House (10^{-3} a 10^{-5}; Clymo, 1978).

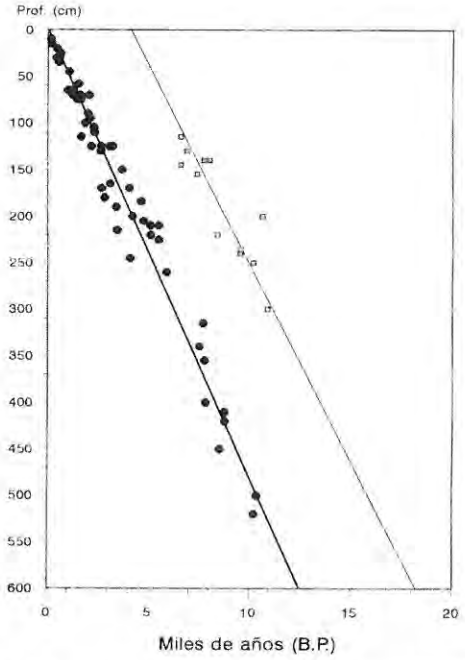


Figura 8.1. Relación entre la edad (en años antes del presente, B.P.) y la profundidad de la turba para turberas de montaña de Galicia.

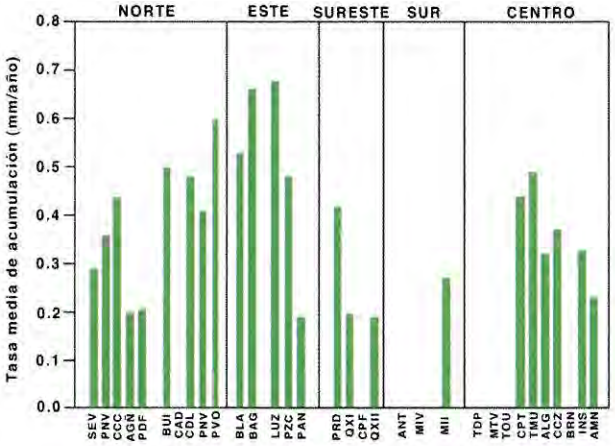


Figura 8.2. Tasas de acumulaciónn de turba para algunas turberas de montaña de Galicia.

Las tasas de acumulación expresadas como espesor (Figura 8.1) varían entre 0.2 y 0.7 mm $año^{-1}$ y son similares a las encontradas por otros autores (Driessen, 1977; Aaby, 1986; Gorham, 1991). La media para Galicia, de 0.45-0.47 mm $año^{-1}$, es más baja que la dada para turberas del norte europeo (0.60-0.75 mm $año^{-1}$; Tolonen, 1979; Aaby, 1986), del mismo orden que la dada para Canadá (0.48 mm $año^{-1}$; Gorham, 1991) y Eurasia (0.52 mm $año^{-1}$; Zurek, 1976) y superiores a las de Siberia (0.2-0.4 mm $año^{-1}$; Botch & Masing, 1983). Estas tasas parecen estar principalmente relacionadas con la edad, aunque también con el tipo de turbera. Las tasas de crecimiento más elevadas (0.6-0.7 mm $año^{-1}$, comparables con las turberas de la Europa nórdica) se han obtenido en turberas que han comenzado a formarse en el episodio del 3.000-2.000 BP, lo que tal vez se deba a una menor compactación de la turba; mientras que para las turberas que han iniciado su formación a principios del

Holoceno, las ombrotróficas tienden a poseer una tasa de crecimiento mayor que las minerotróficas. Además, en las turberas ombrotróficas de las que se dispone de dataciones múltiples, las tasas de crecimiento tienden a ser casi constantes o a variar poco con el tiempo. Este hecho podría estar relacionado con la mayor disponibilidad de agua durante el período de desarrollo de la turba en el sector marítimo donde están ubicadas. En cualquier caso, estos valores deben tomarse únicamente como estimaciones ya que para su cálculo se asume una densidad de la turba constante y ausencia de compactación. De hecho, estos procedimientos han sido criticados por Clymo (1983) y Gorham (1991) y, además, en los perfiles de turba estudiados estas consideraciones no responden a la realidad.

Cuando la acumulación de turba se expresa como adición de masa por unidad de tiempo y superficie, los valores que se han obtenido están entre 40 y 120 g m^{-2} $año^{-1}$ (media 76.7 g m^{-2} $año^{-1}$, desviación típica 27.8), valores considerablemente más elevados que los 29 g m^{-2} $año^{-1}$ dados por Gorham (1991) para turberas subárticas y boreales. Debido a los procesos dominantes que intervienen en la formación de las turberas, éstas pueden ser consideradas como sumideros netos de elementos químicos, en particular de elementos biófilos. En la Tabla 8.1 se dan los valores de acumulación y los flujos de entrada de C, N y S en dos turberas de las sierras septentrionales de Galicia: Penido Vello (PVO) situada a 780 m de altitud y Pena da Cadela (PDC), situada a 970 m. Debido a la lenta descomposición de la materia orgánica, los flujos deben ser considerados como valores mínimos, aunque bastante aproximados, de las tasas de fijación de estos elementos. El flujo medio de acumulación de carbono, el cual puede tomarse como una estimación mínima de la productividad primaria neta (PPN) de estos ecosistemas, es de 0.33 a 0.42 t ha^{-1} $año^{-1}$ para los últimos 4.000 años, lo cual representa una fijación neta equivalente de CO_2 de 1.20 a 1.55 t ha^{-1} $año^{-1}$. El flujo medio de acumulación de N es de 0.012 t ha^{-1} $año^{-1}$ y el de S de 1.9 x 10^{-3} a 5.3 x 10^{-3} t ha^{-1} $año^{-1}$. Estas dos turberas se encuentran ubicadas en la misma sierra a tan sólo 5 km de distancia, pero muestran diferencias considerables en la acumulación de C, N y S, por lo que la altitud (como integradora de condiciones climáticas diferentes) parece desempeñar un papel preponderante en la evolución de las turberas del noroeste. La acumulación neta de C y N en PVO (a más baja altitud) es de 1.5 a casi 2 veces superior a la de PDC, mientras que la acumulación de S es casi 4 veces superior.

PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LA TURBA

En la Tabla 8.2 se presenta un resumen de las propiedades físico-químicas determinadas en turberas de Galicia; algunos datos han sido tomados de referencias bibliográficas. Casi todas las turberas tienen niveles superficiales con materiales orgánicos fíbricos, poco o muy poco descompuestos, generalmente hasta una profundidad que no supera los 25 cm. Por debajo de este nivel superficial hay materiales hémicos seguidos por una capa basal de material sáprico. Sin embargo, las hay que tienen únicamente materiales fíbricos o fíbrico-hémicos y sólo en algunas de las turberas minerotróficas más antiguas se encuentran horizontes sápricos profundos.

La densidad de la turba varía entre 0.06 y 0.60 Mg m^{-3} y la densidad de partículas entre 1.39 y 2.22 Mg m^{-3}, siendo 0.2 y 1.5 Mg m^{-3} respectivamente los valores de referencia para las turberas del noroeste de la Península Ibérica. Los valores más altos corresponden a materiales orgánicos sápricos, como ya habían señalado Lynn *et al.* (1974), a transiciones basales entre la turba y el suelo mineral y a capas intermedias de turberas minerotróficas con bajo grado de descomposición y elevado contenido en componentes inorgánicos. Estos últimos son resultado de la adición de materia mineral debida a la erosión de los suelos en el entorno de la turbera (Van Lierop, 1981) y, en estos casos, el cambio en la densidad de partículas es mayor que en la densidad del suelo (Pontevedra Pombal, 1995). El contenido en C orgánico varía entre el 15% y el 57%, el nitrógeno entre 0.1 y 1.7% y el S entre 0.2 y 2.6%. Los valores más bajos se alcanzan en los niveles con mayor densidad de partícula. Aunque la descomposición de la materia orgánica en las turberas es extraordinariamente lenta debido a los efectos del encharcamiento y la oligotrofia sobre la actividad microbiana (Zak & Grigal, 1991; Gorham, 1995), a lo largo del tiempo se mantiene un nivel mínimo de descomposición (Damman, 1988), hecho que se puede confirmar por las variaciones en profundidad de la relación Cp/Ct. La Figura 8.3 muestra que, aunque el grado de humificación varía bastante de una turbera a otra, para cada una de ellas las transiciones basales o los niveles minerales son los que poseen una materia orgánica más evolucionada, mientras que la turba tiene relaciones Cp/Ct muy bajas (inferiores a 0.05). Algunos estudios en curso, en colaboración con investigadores de la Universidad de Wageningen, sugieren que las transformaciones de los grupos funcionales de carbono en las turberas depende primariamente de la edad –es decir, del tiempo de evolución-, pero también de las condiciones ambientales

Tabla 8.1. Tasas de acumulación de C, CO_2 equivalente, N y S, flujos medios, mínimos y máximos durante los últimos 4.000 años en dos turberas ombrotróficas de las sierras septentrionales de Galicia (Penido Vello, situada a 780 m s.n.m., y Pena da cadela, situada a 980 m s.s.m).

	C	CO_2	N	S
PDC				
Acum. (t ha^{-1})	962	3530	34.0	5.45
Flujo (t ha^{-1} a^{-1})	0.33 ±0.24	1.20 ±0.87	0.012 ±0.009	$1.9\ 10^{-3}$ ±$1.4\ 10^{-3}$
mín-máx	0.009-1.03	0.33-3.77	0.003-0.039	$5\ 10^{-5}$ - $5.8\ 10^{-4}$
PVO				
Acum. (t ha^{-1})	1640	6020	47.1	20.7
Flujo (t ha^{-1} a^{-1})	0.42 ±0.14	1.55 ±0.50	0.012 ±0.007	$5.3\ 10^{-3}$ ±$2.3\ 10^{-3}$
mín-máx	0.21-1.07	0.77-3.91	0.004-0.054	$2.6\ 10^{-3}$ - $1.8\ 10^{-2}$

Tabla 8.2. Propiedades físico-químicas de algunas turberas de Galicia.(Area: N, norte; E: este; SE: sureste; S: sur; C: centro; Horizonte: tipos de horizotes orgánicos presentes; Densidad de la turba y densidad de partícula en Mg m^{-3}; Cenizas, carbono (C), nitrógeno (N) y azufre total (S) en porcentaje; IP: índice de pirofosfato; cationes de intercambio y capacidad de intercambio caitónico en cmol(+) kg^{-1}, los valores con asterisco indican que la CIC se midió en acetato amónico a pH 7, el resto el cloruro amónico al pH de la turba (1; Jato, 1974; 2: Sanmamed, 1979; 3: Torras, 1982; 4: Leirós, 1983; 5: Molinero et al., 1984; 6: Aira y Guitián, 1986a y b; 7: Ramil et al., 1993; 8: Ramil et al., 1994).

Turbera	Sector	Horizonte orgánico	Espesor (cm)	Densidad del suelo	Densidad de partícula	Porosidad (%)	Cenizas	IP	C	N	S
AGÑ[7]	N	Oi-Oe-Oa	130	0.04-0.20	—	—	—	2-5	21-43	—	—
BAG	E	Oi-Oa	135	0.06-0.60	1.40-2.20	55-85	4-63	0-7	29-49	0.2-2.3	0.20-2.60
BDX[7]	SE	Oi-Oe	40	—	—	—	—	—	14-27	0.1-1.0	—
BLA	E	Oi-Oe-Oa	145	0.11-0.26	1.53-1.88	86-93	10-25	2-7	29-44	1.8-2.4	0.73-0.98
BMC[7]	C	Oi-Oa	70	—	—	—	—	—	30-32	0.5-0.7	—
BPA	E	Oi-Oe	190	0.1-0.34	1.50-1.86	81-93	21-57	3-5	23-46	1.1-1.7	0.50-1.10
BRN[4]	C	Oi-Oa	110	—	—	—	—	—	15-32	0.7-2.0	—
BUI[5]	N	Oe	400	0.11-0.19	1.90-2.20	87-92	4-19	—	48-60	—	—
CAD	N	Oi-Oe-Oa	124	0.13-0.98	1.34-2.06	60-91	2.7-79	1-6	17-55	0.5-2.0	0.06-0.30
CDL[8]	N	Oa	400	0.15-0.23	—	—	—	—	39-60	—	—
CPD	E	Oi-Oa	55	0.14-0.17	1.54-1.66	89-90	19-34	1-5	31-37	2.0-2.4	0.79-0.97
LUZ[6]	E	Oi-Oe	540	—	—	—	—	—	14-35	0.8-1.8	—
MII[6]	SE	Oi	140	—	—	—	—	—	38-40	1.8	—
MIM[5]	SE	Oi-Oe	100	-	-	-	-	—	26-34	1.6-2.1	—
PDC	N	Oi	184	0.09-0.16	1.36-1.51	88-94	1.3-7.3	4-7	47-57	1.5-2.2	0.19-0.39
PNV[8]	N	Oi-Oe-Oa	250	0.07-0.32	—	—	—	—	35-51	—	—
PVO	N	Oi-Oe	300	0.09-0.24	1.39-1.53	83-94	1-12	4-5	44-57	1.2-2.3	0.61-0.77
PZC	E	Oi-Oe-Oa	265	0.16-0.60	1.72-2.22	74-91	54-76	2-7	14-25	0.3-1.6	0.30-1.10
QXI[2]	SE	Oi	105	—	—	—	—	—	22-45	0.7-2.0	—
SUA	E	Oi-Oe-Oa	115	0.10-0.23	1.45-1.83	77-93	5-50	2-5	24-50	1.1-2.7	0.54-0.95

Peat	pH H_2O	pH KCl	pH $CaCl_2$	Ca	Mg	Na	K	Al	CIC
BAG	3.5-4.3	2.3-4.3	2.1-4.1	0.8-17.8	0.2-12.1	0.03-0.9	0.01-1.3	2.9-155	11.3-221.3
BDX	4.3-4.6	3.4-3.8	—	0.40-0.70	0.08-0.20	0.01-0.08	0.06-0.10	8.00-10.80	44.7-78.8
BLA	5.9-6.0	5.1-5.3	4.7-4.8	1.80-5.91	0.31-1.00	0.73-2.60	<0.01-2.32	<0.01-0.09	3.79-12.31
BMC	3.9-4.0	3.5-3.9	—	5.60-7.50	1.90-2.20	0.40-0.70	<0.01-0.06	7.10-15.90	99.5-126.9
BPA	3.5-4.3	-		1.0-7.1	0.2-0.9	0.02-0.9	0.02-1.0	2.5-13.4	8.3-16.2
BRN	4.2-4.7	3.8-4.2	—	0.20-0.50	0.10-0.50	0.10-1.70	0.05-0.20	5.00-10.00	60.0-165.5
BUI	3.2-3.8	—	—	<0.01	1.40-3.00	1.00-2.40	<0.01	—	74.9-95.5
CAD	2.5-3.9	2.5-3.0	2.0-2.4	0.1-8.1	0.5-9.3	0.03-1.98	<0.01-1.1	2.7-14	7.1-23.5
CPD	4.3-4.7	3.9-4.3	3.2-3.7	0.60-3.59	0.18-2.47	0.14-0.97	0.25-0.71	6.77-10.38	8.77-17.35
LUZ	3.4-4.8	3.1-3.8	—	3.00-4.30	0.30-1.20	0.20-0.40	0.03-0.20	3.10-4.70	42.2-56.0
MII	4.6-4.9	4.4-4.6	—	—	—	—	—	—	—
MIM	4.7-4.9	4.4-4.6	—	0.40-0.60	0.10-0.30	0.30-0.70	0.05-0.10	0.90-7.10	23.8-30.7
PDC	3.6-4.4	2.9-3.3	2.9-3.2	0.2-4.2	4.7-13.2	0.5-1.2	<0.01-0.5	1.0-3.4	9.8-21.1
PVO	3.6-4.6	2.3-3.3	2.3-3.1	0.08-6.69	4.33-9.36	0.46-1.39	0.02-2.93	0.31-3.76	6.98-20.1
PZC	3.4-4.8	3.4-4.2	3.3-4.1	0.6-11.0	0.9-2.6	0.081.5	0.09-4.2	0.5-5.1	5.6-19.4
QXI	3.8-4.2	2.8-3.6	—	0.50-0.70	0.40-1.20	0.30-0.40	0.07-0.30	3.20-5.3	12.0-16.0
SUA	4.5-5.6	3.6-4.2	3.0-3.9	1.91-10.02	0.28-1.29	1.49-3.37	<0.01-4.02	0.61-3.99	8.18-20.56

exitentes durante la acumulación de la turba, tal vez mediante el control de la composición de las comunidades vegetales y la resistencia que ofrecen sus restos a la degradación.

El pH de las turberas varía entre 3.2 y 4.9, lo que indica condiciones de ácidas a muy ácidas (Figura 8.4), un hecho coherente con la elevada precipitación, los substratos generalmente ácidos, el efecto acidificante de los musgos (Majakova & Proskurjakov, 1972; Motzkin, 1994) y de los ácidos orgánicos formados durante la evolución de la materia orgánica acumulada (autoacidificación). Excepcionalmente, el pH es ligeramente ácido a neutro en aquellos casos en que aguas que drenan niveles calizos se infiltran en la turbera (BLA, Tabla 8.2).

La acidez característica de los ambientes de turbera se debe en parte al intercambio iónico entre el agua de la turbera y la vegetación viva, en particular los esfagnos, pues lo pocos cationes disponibles son tomados por las plantas e intercambiados por protones. Shotyk (1988), no obstante, señala los trabajos pioneros de Stremme (1908) y otros, quienes argumentan que el dióxido de carbono disuelto puede explicar al menos una parte de la acidez de la turbera. Debido a la baja capacidad amortiguadora, el dióxido de carbono se disociaría liberando protones y confiriendo a las aguas de poro de la turba un pH alrededor de 4. También podrían contribuir a esta acidez natural diversos compuestos orgánicos, como ácidos húmicos.

La capacidad de intercambio de cationes efectiva (CICe) varía entre 4 y 20 $cmol_c\ kg^{-1}$. Los cationes de intercambio siguen la secuencia Mg^{+2},Ca^{+2} > Al^{+3} > Na^{+} > K^{+} en los niveles superiores de las turberas de cobertor y Al^{+3} > Mg^{+2}, Na^{+} > Ca^{+2} > K^{+} en los más profundos; en las turberas minerotróficas el orden más frecuente es Al^{+3} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > Na^{+} > K^{+} (en BLA el Ca es más abundante que el Al en toda la turbera). La abundancia de Mg en las turberas de cobertor de las sierras septentrionales se debe al efecto de los aerosoles marinos –hecho apoyado también por las elevadas concentraciones de Br^{-}, mientras que el predominio del Al en las minerotróficas es una consecuencia directa de la composición de las aguas que drenan los suelos ácidos de su entorno. Independientemente de estas generalizaciones, muchos testigos de turba muestran variaciones en la distribución de los cationes intercambiables con la profundidad (Figura 8.5). La capacidad de intercambio de cationes (CIC) a pH 7 es, lógicamente, mucho más elevada, entre 24 y 165 $cmol_c\ kg^{-1}$, con las mayores diferencias frente a la CICe en las muestras de turba más ácidas y con mayor grado de descomposición.

En función del origen de los nutrientes, las turberas formadas en depresiones (fens) han de ser consideradas como minerotróficas ya que la principal fuente de cationes es la meteorización del sustrato o las aguas que circulan por los diferentes circuitos hidrológicos terrestres. Las turberas de cobertor son ombrotróficas, alimentadas por agua de lluvia, aunque incluso en estos casos la composición del complejo de intercambio de los niveles más profundos está, en algún grado, influenciada por el sustrato. Mientras que, como ya se ha mencionado, las turberas elevadas poseen un nivel superficial ombrotrófico que se ha desarrollado sobre otro minerotrófico.

Las relaciones atómicas entre la materia orgánica activa (extraída con pirofosfato, Cp) y el Fe y Al extraídos con pirofosfato, oxalato o tetraborato, indican que la materia orgánica está fuertemente insaturada en metales y tiene una alta capacidad de complejación. La insaturación tiende a aumentar hacia la base de la turbera, al igual que el grado de descomposición de la materia orgánica, y alcanza el máximo en los horizontes A enterrados y en las capas de transición entre la turba y el sustrato mineral (Pontevedra Pombal, 1995).

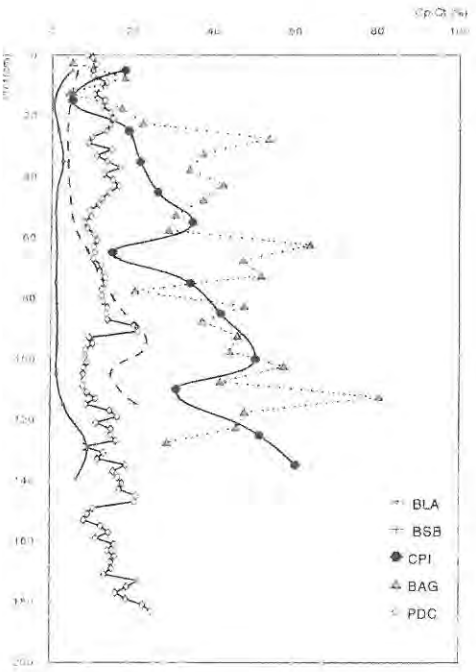


Figura 8.. Perfiles verticales de variación del pH en algunas turberas (BPA: Braña de Porto Ancares; PVO: Penido Vello; PZC: Poza da Lagoa Maior; BAG, BLA y BSB igual a la figura anterior.

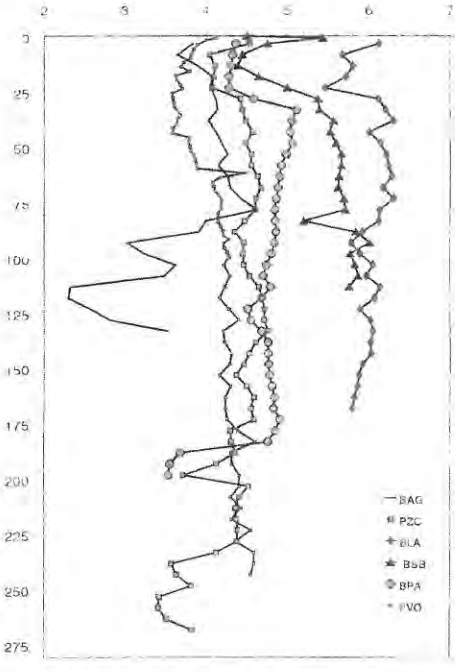


Figura 8.. Perfiles de relación Cp/Ct (en %) en algunas turberas (BLA: Braña de Lamela; BSB: Braña de Suárbol; CPI: Braña da Cespedosa I; BAG: Braña de Agolada; PDC: Pena da Cadela).

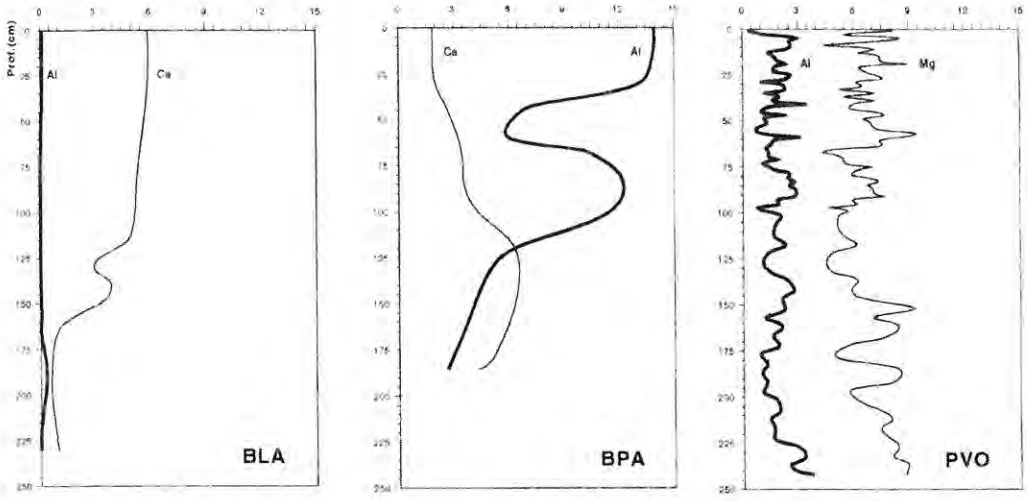


Figura 8.5. Perfiles de concentración de los cationes dominantes en el complejo de intercambio catiónico del algunas turberas ($cmol_c kg^{-1}$)urberas de Galicia. BLA: Braña de Lamela, BPA: Braña de Porto Ancares, PVO: Penido Vello).

SUELOS DE TURBERA: HISTOSOLES

La clasificación de estos suelos reviste especial complejidad por diversos motivos, como por ejemplo la subjetividad de los métodos empleados para la determinación del grado de descomposición de la turba, el contenido de fibras, la dificultad para estimar el procentaje de arcilla de un material dominado por la materia orgánica, la heterogeneidad de la metodología empleada en los diversos estudios y, en general, por la carencia de datos suficientes en la mayoría de las publicaciones. Por ello, la que aquí se aporta ha de ser considerada como una clasificación aproximada para una buena parte de los suelos cuyos datos se han tomado de la bibliografía.

En la Tabla 8.3 damos una relación de turberas de montaña representativas de diversos sectores de Galicia, indicando la sierra en la que se ubica, la altitud, la edad radiocarbónica (no se trata siempre de la edad basal máxima) y la clasificación según los sistemas FAO (1990) y Soil Taxonomy (SSS, 1997). En esta muestra predominan los Histosoles fíbricos (BUI, CAD, CDL, MIM, MII, PDC, PVO, QXI, BLA) y tércicos (AGÑ, BDX, BUI, CPD, PNV, PZC), habiendo también Histosoles tiónicos (BAG), fíbrico-tiónicos (SUA) y térrico-tiónicos (BPA), según la clasificación de la FAO. Con la clasificación norteamericana los suelos dominantes son los Fibrists (sphagnofibrists: CAD, CDL, MII, MIM, PDC, PNV, PVO; borofibrists: QXI, BLA; y medifibrists: BDX, BUI). Además aparecen otros grupos como los Hemists (sulfihemists: BAG, BPA; medihemist: BUI) y Saprists (medisaprist: AGÑ; borosaprist: CPD; sulfisaprist: SUA).

Código	Nombre	m s.n.m) Localización	Altitud m s.n.m	(Edad (BP)	Clasificación
AGÑ	A Gañidoira	S. Septentrionales	720	6895 ±50 (130 cm)	Histosol térrico Medisaprist
BAG	Agolada	Sierra de Ancares	1230	3390 ±40 (215 cm)	Histosol tiónico Sulfihemist
BLA	Braña de Lamela	Sierra de Ancares	1280	3090 ±35 (165 cm)	Histosol fíbrico Borofibrist
BDX	Braña dos Xuncos	Manzaneda-Queixa	1580	——	Histosol térrico Medifibrist
BPA	Braña de Porto Ancares	Sierra de Ancares	1580	10650 ±170 (195 cm)	Histosol térrico-tiónico Sulfihemist
BUI	Braña do Buio	Montes del Buio	620	7725 ±50 (315 cm)	Histosol térrico/fíbrico Medihemist/Medifibrist
CAD	Cadramón	Sierra de O Xistral	1040	——	Histosol fíbrico Sphagnofibrist
CDL	Chao de Lamoso	Sierra del O Xistral	1039	8785 ±30 (415 cm)	Histosol fíbrico Sphagnofibrist
CPD	Campa da Cespedosa	Sierra de Ancares	1415	2070 ±25 (95 cm)	Histosol térrico Borosaprist
LUZ	Lagoa de Lucenza	Sierra de O Caurel	1440	17390 ±90 (700 cm)	Histosol térrico Borohemist
MII	Manzaneda II	Manzaneda-Queixa	1700	——	Histosol fíbrico Sphagnofibrist
MIM	Manzaneda I	Manzaneda-Queixa	1630	——	Histosol fíbrico Sphagnofibrist
PDC	Pena da Cadela	Sierra de O Xistral	980	4.600 ± (185 cm)	Histosol fíbrico Sphagnofibrist
PNV	Pena Vella	A Toxiza	700	5.080 ±40 (220 cm)	Histosol térrico Sphagnofibrist
PVO	Penido Vello	Sierra de O Xistral	790	4.070 ±50 (245 cm)	Histosol fíbrico Sphagnofibrist
PZC	Pozo do Carballal	Sierra de Ancares	1330	10370 ±210 (265 cm)	Histosol térrico Borofibrist
QXI	Braña de Queixa	Sierra de Queixa	1600	——	Histosol fíbrico Borofibrist
SUA	Braña de Suárbol	Sierra de Ancares	1080	1250 ±25 (70 cm)	Histosol fíbrico-tiónico Sulfisaprist

Dinámica geoquímica de las turberas de Galicia

A. Martínez Cortizas, W. Chesworth y
E. García-Rodeja

QUÍMICA DE LAS AGUAS SUPERFICIALES

Como ya se ha mencionado en diversas ocasiones, las turberas se caracterizan por ser ecosistemas formados casi exclusivamente por agua (en particular las ombrotróficas), pues constituye el 90% o más en peso de la turba. Por otro lado, la presencia de agua es imprescindble para la evolución y pervivencia de la turbera y, en buena medida, la vegetación que soporta está relacionada con su concentración de nutrientes. En Galicia, las aguas son en general oligotróficas con independencia del tipo de turbera que se considere, si bien hay diferencias en su composición. La química de las aguas superficiales puede considerarse un buen indicador de la naturaleza y procedencia de las aguas entrantes.

El estudio de las aguas de turberas del noroeste peninsular se encuentra actualmente en sus inicios, por lo que los resultados han de tomarse como preliminares. El estudio se llevó a cabo en turberas de las sierras septentrionales y orientales. Las turberas se diferenciaron en ombrotróficas (representadas sólo en el norte) y minerotróficas tomando como base estudios previos de los factores de formación y la naturaleza físico-química de la turba. En las minerotróficas se recogieron tanto muestras de aguas circulantes como de aguas estancadas. En la Tabla 9.1 se dan los valores medios, desviación típica, mínimos y máximos observados para algunos parámetros.

Los resultados indican que hay cuatro factores principales que controlan la naturaleza química del agua: el efecto marino, ligado a la distancia al océano; el relieve montañoso, acoplado al anterior y al clima; el tipo de turbera y el estado del agua en la misma (estancada o circulante). Estos efectos son evidentes en la acidez de las aguas, la conductividad eléctrica, la concentración de cloruros, sulfatos, aluminio, calcio y sodio. Para algunas propiedades las diferencias observadas se deben a más de uno de estos factores.

La distancia al mar y el relieve

Este factor es el que tiene un efecto dominante sobre la concentración de cloruros y sodio, para los cuales el mar es el origen principal. Así, las turberas de las sierras septentrionales tienen valores significativamente más elevados que las de las sierras orientales. También parece influir en la concentración de sulfatos, en parte de origen marino, pues hay una diferencia significativa entre las montañas litorales y las interiores.

Al mismo tiempo, la elevada concentración de cloruros y de sodio podría ser la responsable de una conductividad eléctrica más alta en las sierras septentrionales; ambos están muy correlacionados con la conductividad (coeficientes de correlacción de 0.90). En cualquier caso, la condictividad es baja, tal como corresponde a aguas oligotróficas.

La relación Cl/Na es otro buen indicador del efecto marino (Malmer, 1962b). En las aguas de turberas próximas a la costa esta relación es similar a la del agua del mar, mientras que hacia el interior de Galicia es inferior y alcanza los valores mínimos observados (Fig. 9.1). No obstante, este parámetro parece estar a su vez afectado por el relieve, pues las turberas situadas en la vertiente norte de la Sierra del Xistral, a barlovento de los vientos oceánicos, tienden a poseer valores más altos que las situadas a sotavento.

Tipo de turbera: ombrotrófica vs minerotrófica

La procedencia atmosférica exclusiva del agua que llega a las turberas ombrotróficas imprime unas características distintivas a sus aguas superficiales. Éstas son más ácidas (Figura 9.2) y más pobres en calcio que las de turberas minerotróficas, las cuales no se diferencian significativamente entre si ni en acidez ni en concentración de calcio (véase Tabla 9.1). De igual modo, sería de esperar que se encontrasen diferencias entre los tipos de turberas para otros nutrientes como magnesio o sodio, pero el efecto marino se solapa aquí en gran medida.

Las concentraciones de aluminio, aunque bajas, también responden al tipo de turbera, pues la mayor acidez de las ombrotróficas permite que este elemento se encuentre en disolución, lo cual no ocurre en las minerotróficas. Por el contrario, las concentraciones de silicio son mayores en las minerotróficas fruto de la procedencia solígena de al menos parte de las entradas de aguas.

Estado de las aguas superficiales: estancadas vs circulantes

Aún tratándose de un estudio preliminar, los datos obtenidos por el momento parecen indicar que la química de las aguas puede estar afectada por el grado de estancamiento que tengan. Así, se ha encontrado que las aguas estancadas tienden a poseer un pH más ácido que el de la aguas circulantes, entre 0.5-1.0 unidades, y concentraciones más elevadas de cloruros y más bajas de calcio, magnesio y sodio. Como consecuencia, las relaciones Cl/Na de las aguas estancadas son mas altas que las de aguas circulantes.

Otros efectos

Además de estos factores que podemos denominar natulares, las aguas superficiales están afectadas por diversas actividades humanas que se desarrollan directamente sobre las turberas o que son el resultado de transformaciones indirectas sobre los terrenos circundantes o sobre cauces que drenan hacia las mismas –descritas en el Capítulo 11. En el noroeste, los cambios principales se deben a la transformación en pastizal, con aplicación de encalantes y fertilizantes, lo que modifica no sólo la química del agua sino también y de forma drástica las comunidades vegetales y el pastoreo de las mismas.

Estas actividades son muy variables y afectan en particular a algunas unidades de turberas minerotróficas y de turberas elevadas, dando como resultado impactos locales importantes. Esto se refleja en la variabilidad que toman indicadores químicos como por ejemplo el pH, que llega a ser próximo a la neutralidad

Tabla 9.1 Valores medios, desviación típica (±), mínimo y máximo (entre paréntesis) de algunas propiedades químicas de las aguas de turberas del noroeste peninsular (CE en $mScm^{-1}$, cationes y aniones en mg L^{-1}).

(Turbera de Veiga do Tremoal, Tremoal do Rego). Otro indicador es la concentración de nitratos, que es bastante alta en las turberas minerotróficas, tal vez como resultado de la sobrecarga de ganado en las mismas.

LOS AMBIENTES QUÍMICOS EN LAS TURBERAS

Nos referiremos aquí brevemente a los ambientes químicos que se dan en profundidad en las turberas y cómo afectan éstos a la estabilidad de los minerales, dependiendo de las condiciones de acidez y pontencial de oxidación. Para ello conviene recordar que en la parte superior de la turbera existe un nivel de escaso espesor de pH entre 3 y 5, bien oxigenado y en contacto con la atmósfera –que se ha denominado acrotelm- y que por debajo del mismo se encuentra el catotelm, nivel anóxico situado bajo el nivel freático. Éste último puede dividirse, a su vez, en una zona superior no sulfúrica y una zona inferior sulfúrica.

En la Figura 9.3 se muestra las características de la deposición mineral en las turberas y las posibles transformaciones que pueden sufirir los minerales presentes (básicamente cuarzo, feldespatos, minerales ferromagnesianos, caolinita, gibsita, pirolusita y óxidos de hierro). Los diagramas triangulares dan la misma información en diagramas de fases ajustados al pH y presión parcial de oxígeno. Los diagramas de fases son proyecciones de disoluciones del sistema SiO_2-Al_2O_3-Fe_2O_3-H_2O.

De forma simplificada podemos indicar que existe una barrera geoquímica regulada por el pH 4, que separaría los medios fuertemente ácidos de los ácidos; y otras dos barreras representadas por el potencial del oxidación –expresado como presión parcial de oxígeno, PO_2 una a 10^{-12} bar, que separaría la zona oxidada de la zona anóxica no sulfúrica, y otra a 10^{-70} bar, que separaría ésta última de la zona sulfúrica. Este modelo geoquímico compartimenta la turbera verticalmente en tres zonas de potencial, en las cuales la evolución mineral va a depender de la acidez de las aguas de poro de la turba.

En el acrotelm de las turberas más ácidas (pH<4) tan sólo el cuarzo y la goetita serían minerales estables, estando el Al en disolución, tal como indican los datos obtenidos para las turberas ombrotróficas de las Sierras Septentrionales. Si el grado de acidez es menor, a estos dos minerales se unirían la gibsita y la caolinita; algo que debe ocurrir en todas las turberas minerotróficas analizadas.

Algunas turberas de cobertor tienen un pH inferior a 4 en todo el espesor analizado, lo que sugiere que en la zona anóxica no sulfúrica tan sólo el cuarzo sería estable, estando el Al y el Fe en disolución. Por el contrario, en todas las minerotróficas que hemos estudiado el pH es superior a 4, lo que implica que son estables el cuarzo, la caolinita y la gibsita, mientras que el Fe estaría en disolución como Fe(II).

Finalmente, en aquellas turberas que tienen un espesor muy elevado es factible que aparezca una zona anóxica sulfúrica. En ambientes fuertemente ácidos además del cuarzo, en esta zona sería estable la pirita y el Al estaría en disolución; mientras que en ambientes menos ácidos, cuarzo, caolinita, gibsita y pirita serían estables.

Este modelo predice por tanto la estabilidad de diversas fases minerales que llegan a la turbera por deposición atmosférica de polvo procedente de la erosión de los suelos del entorno. Pero además, sirve de base para predecir el comportamiento que pueden tener otros elementos que alcanzan la superficie de la turbera (Pb, Cd, As, Hg, etc...) y poseen un importante papel como contaminates. Las turberas, por su elevado contenido en materia orgánica, funcionan a modo de sumideros netos y filtros

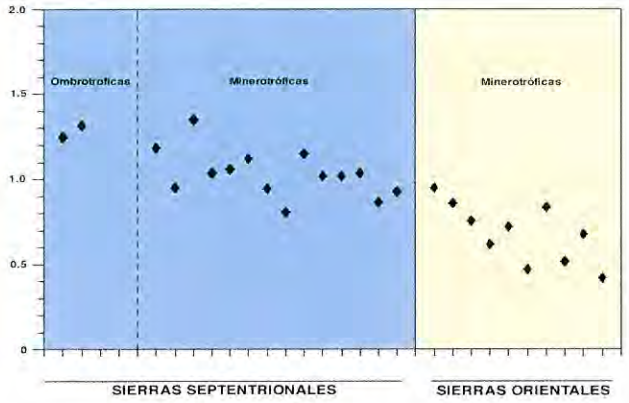


Figura 9.1. Relación Cl/Na de las aguas de algunas turberas ombrotroficas y minerotróficas de las sierras septentrionales y orientales de Galicia.

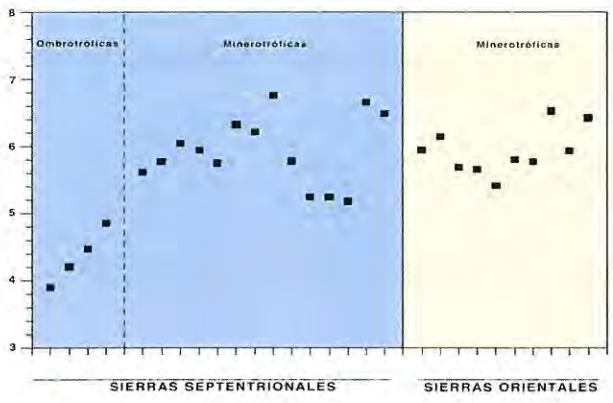


Figura 9.2. pH de las aguas de algunas turberas ombrotroficas y minerotróficas de las sierras septentrionales y orientales de Galicia.

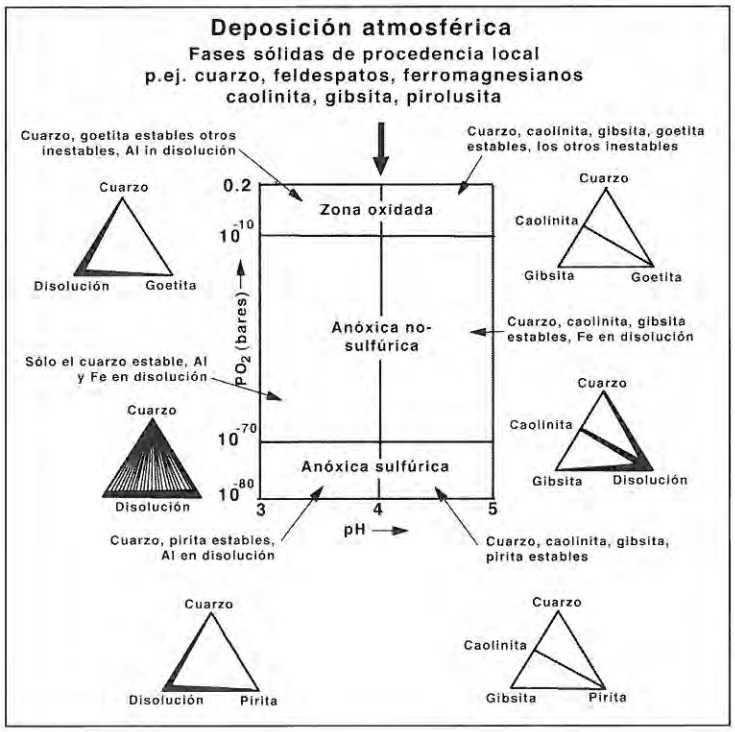


Figura 9.3. Ambientes químicos de una turbera ombrotrófica en función del potentcial de oxidacción-redución y del pH. Arriba se indican las fase minerales presentes en la deposición atmosférica, que dependen de la mineralogía dominante en los de los suelos del noroeste peninsular (no se han tenido en cuenta posibles fuentes de contaminación antropogénica).

para estos elementos, pero la evolución de los mismos y su transferencia hacia las aguas dependerá de las condiciones químicas existentes. A ello habrán de añadirse las acciones directas o indirectas de las actividades humanas, que pueden cambiar de manera drástica la química de la turbera.

Otro aspecto relevante que debe ser considerado cuando se estudian las turberas como sumideros de elementos tóxicos, es que la deposición atmosférica se produce siempre en el medio oxidado superficial del acrotelm y que por tanto será la acidez la que regule las potenciales transformaciones iniciales. Debido al crecimiento de la turba por acreción, los componentes depositados en un momento dado irán pasando progresivamente hacia el catotelm, donde el ambiente biogeoquímico es bien distinto, pudiendo darse cambios en las tendencias geoquímicas para un mismo mineral o elemento. Por tanto, las posibles vías de evolución habrá que considerarlas dentro de un modelo dinámico que tenga en cuenta el crecimiento de la turbera, pues es clave para determinar cuándo una carga mineral pasará de un ambiente oxidado y ácido a otro reducido y en general menos ácido. Sólo a título orientativo, en la turbera de PVO el catotelm se encuentra a unos 50-60 cm, dándose un cambio de pH de valores inferiores a 4 a ligeramente superiores al mismo. Si tenemos en cuenta que la tasa media de acumulación de turba ha sido de 1 cm cada 20-25 años, los minerales que hoy están comenzando a evolucionar en el catotelm se depositaron y estuvieron en un medio oxidado y fuertemente ácido durante al menos unos 1.000 a 1.500 años.

Por tanto, el tiempo transcurrido desde la deposición hasta hoy es de vital importancia para predecir el comportamiento de los elementos químicos en las turberas. Por ejemplo, si un elemento se deposita bajo unas condiciones que impiden su movilidad geoquímica será retenido de forma efectiva; pero si una vez en el catotelm las condiciones favorecen su movilidad, la cinética de las reacciones que gobiernen su paso a la disolución es la que decidirá si se da una removilización significativa o no.

Las turberas como archivos geoquímicos de los cambios ambientales

A. Martínez Cortizas, E. García-Rodeja
X. Pontevedra Pombal y J.C. Nóvoa Muñoz

ALGUNOS EJEMPLOS

A continuación hacemos un síntesis de algunos resultados obtenidos en este campo de investigación en los últimos cinco años a través del estudio de turberas ombrotróficas de las sierras septentrionales de Galicia.

En la turbera ombrotrófica de Penido Vello (PVO), situada en la Serra do Xistral, y con una edad que supera los 6.600 años B.P., se ha determinado el contenido total en Pb y Zn mediante un analizador multielemental EMMA -Energy-dispersive Miniprobe Multielement Analyzer- (Cheburkin y Shotyk, 1996; Weiss *et al.*, 1998) y en extractos con KCl 1M (Voltametría, Methron 646 VA-Processor) y Hg mediante un equipo Leco AMA-254 (Martínez Cortizas *et al.*, 1997, 1999). En general, los contenidos mas elevados de todos los metales se encontraron en las muestras superficiales de turba, disminuyendo con la profundidad hasta alcanzar niveles muy bajos en la parte basal, más antigua. Este es el caso de metales como el Zn y el Cd.

Para el Pb (Figura 10.1) el perfil de distribución con la profundidad y, en consecuencia, con la edad de la turba, sugiere que la contaminación por Pb se remonta a hace unos 2.800-3.000 años y que, desde la Edad del Hierro, se ha producido un lento incremento en la contaminación, hasta alcanzar valores considerablemente elevados, de hasta 5 veces el nivel de fondo, en época romana y mucho más elevados tras la revolución industrial, indicando la importante influencia de las actividades mineras y metalúrgicas en las emisiones de metales a la atmósfera, sobre todo en los últimos 300 años. Las variaciones en la acumulación de Pb en la turbera PVO muestran una buena relación con los datos prehistóricos e históricos de la minería y metalurgia de este metal en la Península Ibérica.

En el caso del Hg, además de su concentración total, en las muestras se ha medido también su labilidad térmica (desorción a 30° y 105° C), expresando el Hg desorbido/retenido por la turba como proporciones del Hg total: baja estabilidad, HgL, proporción de mercurio desorbido a 30° C; de moderada estabilidad, HgM, mercurio desorbido entre 30° y 105° C y mercurio de elevada estabilidad, HgH, retenido por la turba tras calentar a 105° C. Las variaciones temporales de cada una de estas proporciones para los últimos 4.000 años, muestran una clara relación con el registro del cambio climático en el suroeste de Europa y la Península Ibérica en general y de Galicia en particular (Martínez Cortizas *et al.*, 1999). Estas variaciones son independientes de la historia de la minería y de la metalurgia del Hg, pero parecen depender de las condiciones climáticas ocurridas durante la deposición. Así, en períodos climáticos fríos las formas lábiles de Hg (HgL) constituyen la fracción más abundante, mientras que en las muestras correspondientes a períodos cálidos predominan las más estables, HgM y HgH. Además, para muestras con edades superiores a los 2.200 años, el Hg acumulado puede expresarse como una función de dichas proporciones; dado que para edades anteriores a la citada no se conoce actividad minera ni metalúrgica, puede asumirse que dicha función es un modelo adecuado para la estimación de la acumulación de Hg de origen natural (HgNAT). La función obtenida se ha empleado para el cálculo del HgNAT en las muestras de edad más reciente que 2.200 años y, consecuentemente se ha podido, así mismo, obtener una estimación del Hg de origen antropogénico (HgANT), como diferencia entre el Hg total y el de origen natural.

La distribución de HgNAT (Figura 10.2) indica que los climas fríos favorecen la acumulación mientras que en los cálidos se ven favorecidas las pérdidas de este elemento desde la turbera –revolatilización-, conduciendo a una menor acumulación de Hg. El enriquecimiento antrópogénico en Hg acumulado en la turba se ajusta mejor a los registros históricos de la minería y metalurgía de este elemento en la Península y sugiere que ésta comenzó al menos hace 2.400 años BP, aunque su acumulación

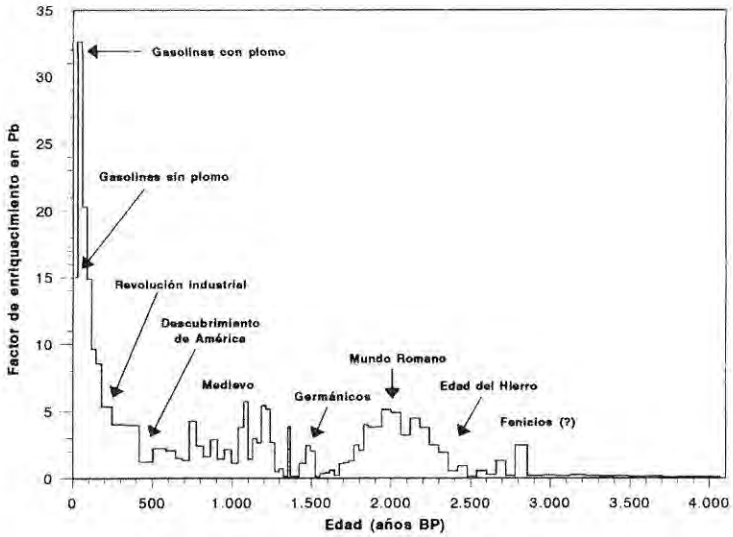


Figura 10.1. Registro de la contaminación atmosférica por Pb obtenido por medio del estudio de su acumulación en una turbera ombrotrófica de la Serra do Xistral.

se sigue viendo afectada por la influencia de las condiciones climáticas reinantes durante el tiempo de la deposición.

No obstante, además de metales como el Pb y Hg, existen otros elementos que se acumulan de forma que es posible interpretarlos en términos cronológicos. En la Tabla 10.1 se refleja la acumulación total de diversos elementos, ocurrida en la turbera ombrotrófica de PDC durante los últimos 4.000, 500 y 300 años. El hierro es el elemento dominante, con unos 3.000 kg ha^{-1}, seguido de Br y Ti con 300-430 kg ha^{-1}. El Zn, Pb, Sr, Zr, y Cr, tienen una acumulación de entre 10 y 40 kg ha^{-1}, mientras que los demás elementos presentan acumulaciones entre los 2 y 8 kg ha^{-1}. Así pues, la acumulación a largo plazo está dominada principalmente por el aporte de elementos litogénicos (Fe, Ti) procedentes de la erosión de los suelos, y por los de origen marino (Br) que son aportados a la turbera debido a su proximidad a la costa. No obstante, cuando se considera la acumulación en épocas recientes (últimos 500 y 300 años) destacan elementos tales como el Zn, Mn, Pb y As, para los cuales entre la mitad y las tres cuartas partes de la acumulación total ha ocurrido en época histórica, o como el Cr, Ni y Cu para los cuales entre la cuarta parte y la mitad de la acumulación es reciente. Es decir, los datos revelan una importancia creciente de los procesos de contaminación atmosférica por actividades humanas. Por otro lado, además de la influencia global y regional en la deposición de metales aportados por vía atmosférica, estos resultados también evidencian la acción de fuentes locales de contaminación. Las emisiones de la central térmica de As Pontes, situada en las cercanías de la Serra do Xistral, en funcionamiento desde finales de la década de los años 70 del siglo XX, podrían ser responsables de las elevadas concentraciones de metales (Pb, Hg, Mn, Zn o As), encontradas en los niveles más superficiales de turba.

Estos resutlados han permitido ir desvelando el papel que las actividades mineras, metalúrgicas e industriales han tenido y están teniendo en la evolución de la contaminación atmosférica en el noroeste peninsular. Pero además, como se muestra en la figura 10.3, el estudio de los geoindicadores ha llevado a la obtención registros de alta resolución tanto para otros procesos inducidos por las actividades humanas (por ejemplo, la erosión de suelos) como para cambios ambientales de origen natural (como los cambios climáticos). La conseccución de estos registros está dando lugar, asímismo, a la elaboración de una síntesis más precisa de la evolución de los paleoambientes galaicos (véase Martínez Cortizas, 2001) y a avances fructíferos en los estudios sobre la dinámica cultural prehistórica e histórica (p.ej. Fábregas *et al.* 2001).

Es de esperar que en años venideros asistamos a una integración de los resultados obtenidos por diversas disciplinas y técnicas (como el estudio de microfósiles), que contribuya a un mejor conocimiento de los ambientes pretéritos y de la evolución de la biodiversidad en nuestra comuniadad autónoma. Los registros paleoambientales son las bases de datos que revelan lo ocurrido en los ecosistemas naturales con y sin la intervención humana, necesarias para poder evaluar los estados actuales, identificar en qué medida esos estados se desvían del rango de estados naturales mostrados en el pasado así como identificar las causas, desarrollar modelos predictivos validados de posibles trayectorias o escenarios futuros y diseñar estrategias de recuperación y conservación adecuadas.

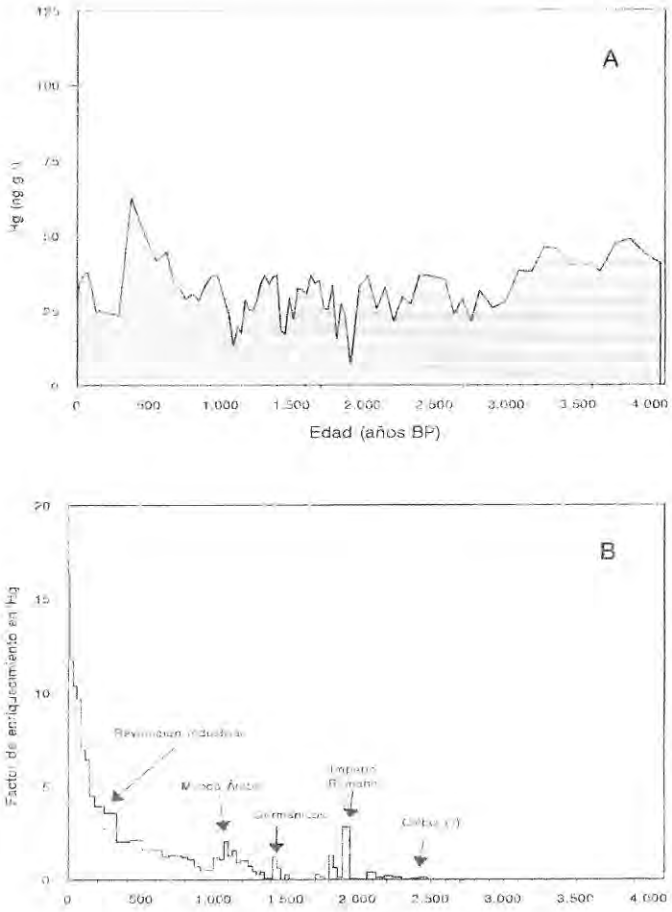
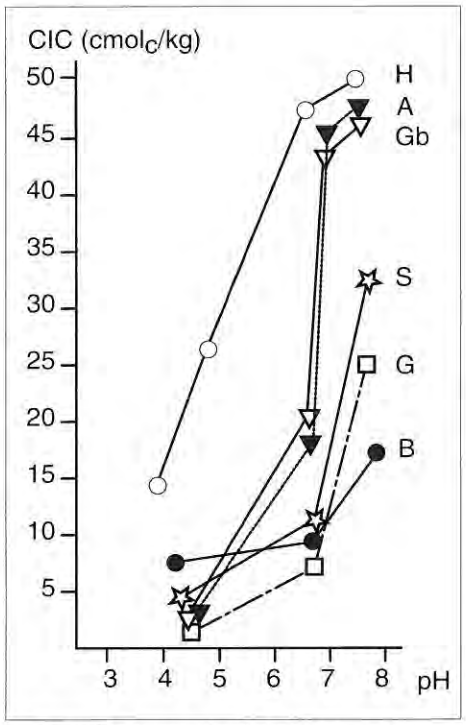


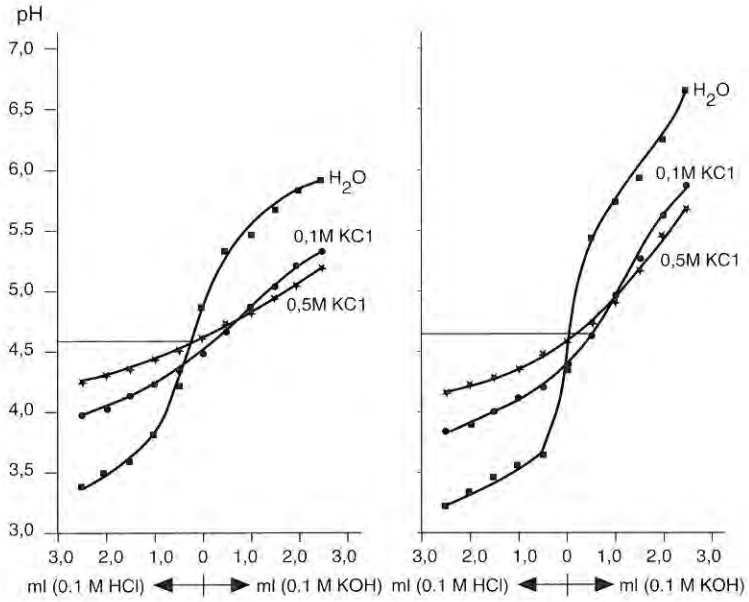
Figura 10.2. Registro de la contaminación atmosférica por Hg obtenido por medio del estudio de su acumulación en una turbera ombrotrófica de la Serra do Xistral.

IMPORTANCIA DEL ALUMINIO EN EL COMPORTAMIENTO GEOQUÍMICO DE LOS SUELOS DE GALICIA. PUESTA EN EVIDENCIA DE UN MEDIO DE TRANSICIÓN ENTRE EL DOMINIO TEMPLADO Y SUBTROPICAL HÚMEDO

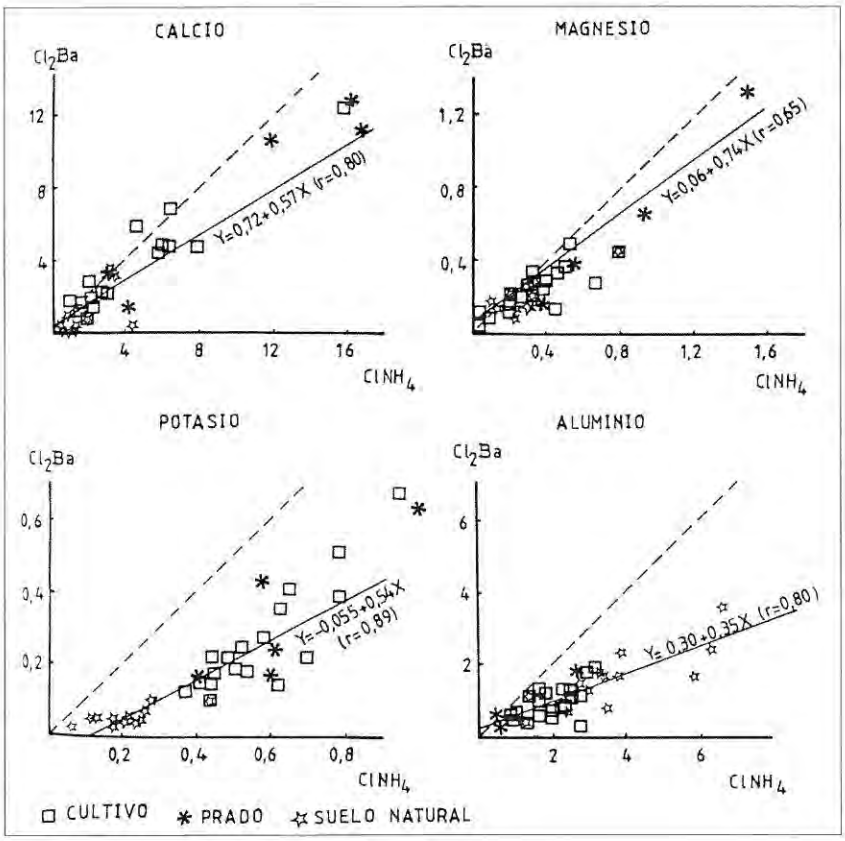
1 .ASPECTOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CAMBIO DE LOS SUELOS DE GALICIA



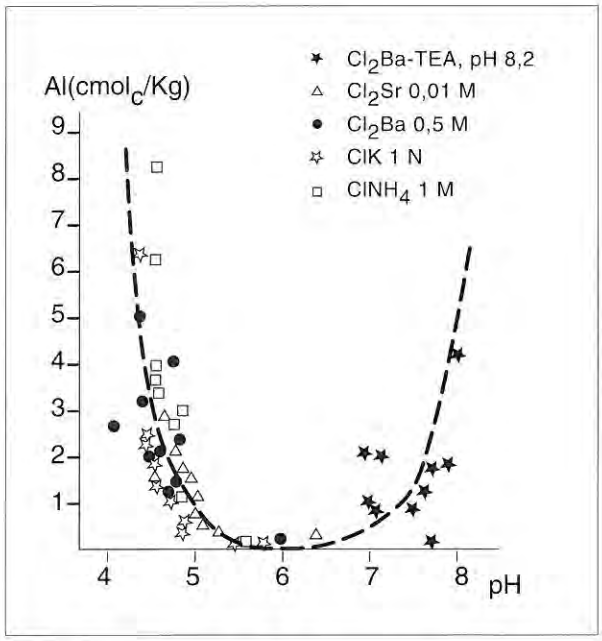
Relación entre el pH del extracto y el valor de la CIC (extractos de NH4Cl 1M, AcONa, pH7 y BaC TEA, pH8.2) (Horizonte superficial de un suelo orgánico: H; Horizontes A de suelos sobre anfibolitas (A), gabros (Gb), sepentinitas (G); B: Horizontes Bw, valores medios de distintos materiales) (Calvo de Anta et al., 1992)



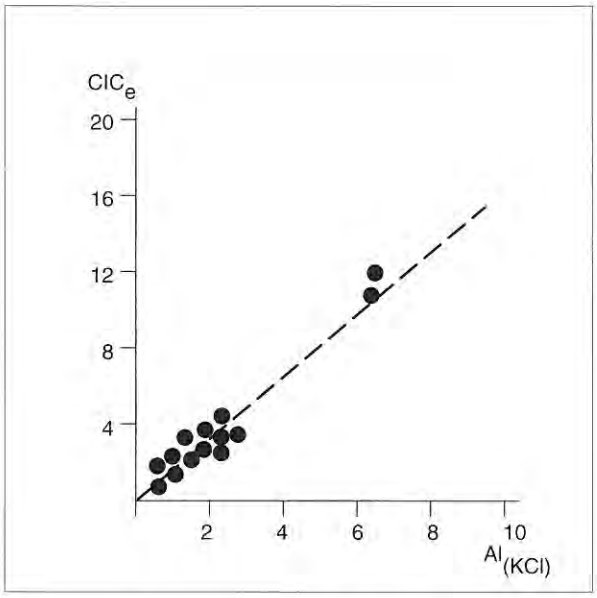
Curvas de titulacion sobre 20 ml de suspensión de suelo a diferentes fuerzas iónicas (perfil sobre granulitas de la Capelada) (van den Born et al., 1985)



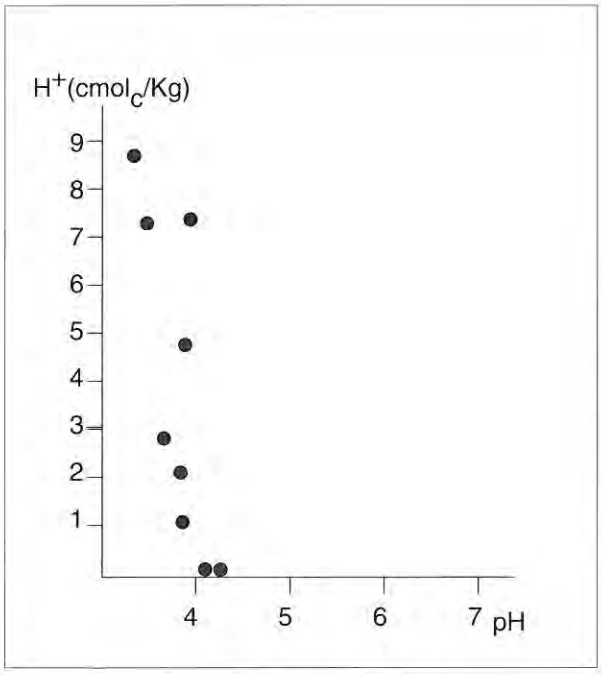
Cationes de cambio obtenidos por dos métodos de extracción habituales (CNH4 1M y CaCl2 0.6N)(las muestras corresponden a suelos sobre esquistos) (Alvarez Rodriguez y Calvo de Anta, 1992)



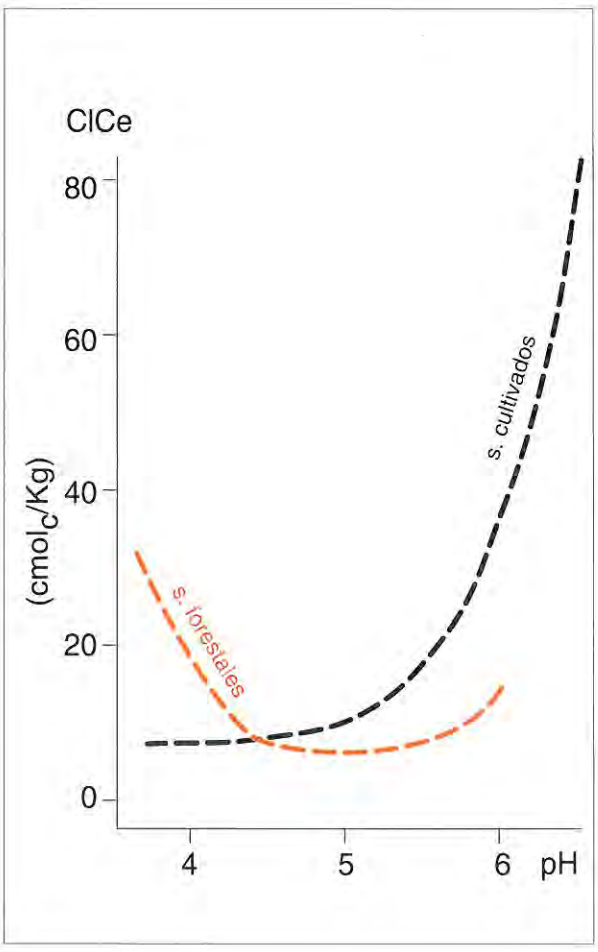
Relación entre el Al obtenido por diversos extractantes y el pH final del extracto



Relación entre el Al extraido y la CIC_e (cmol$_c$/Kg)

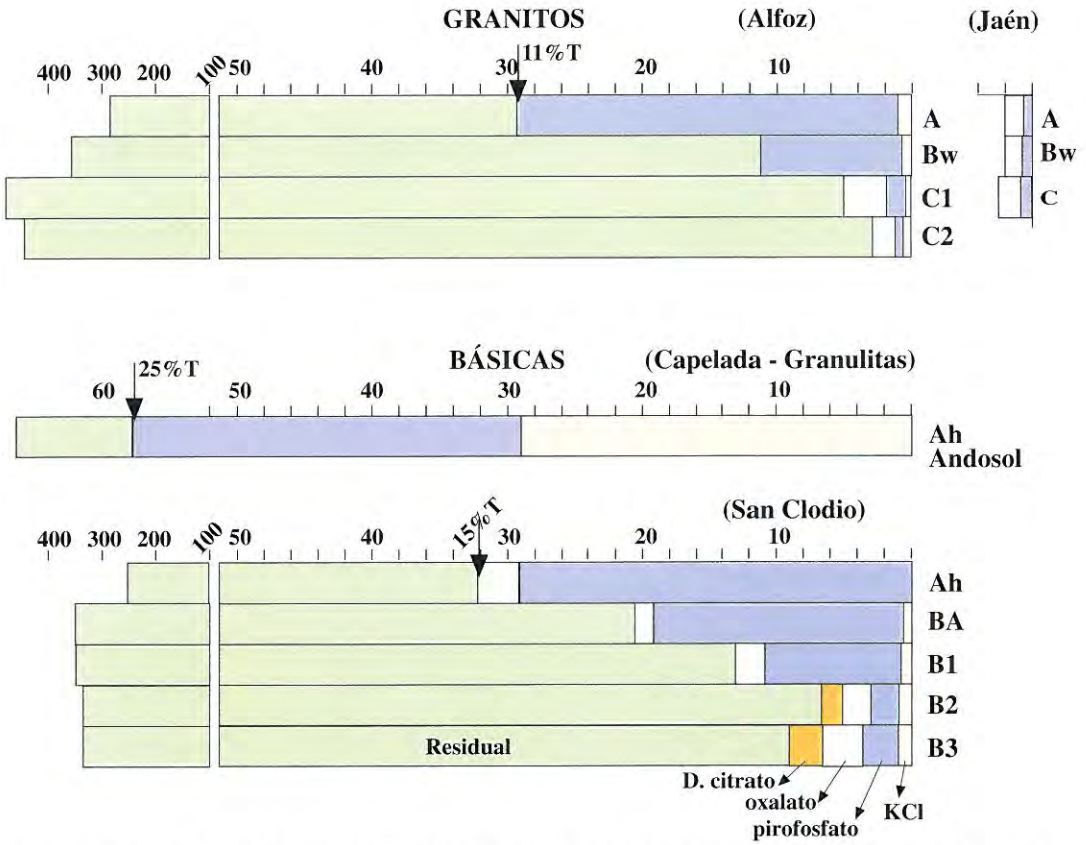


Relación entre el H^+ obtenido por diversos extractantes y el pH final del extracto

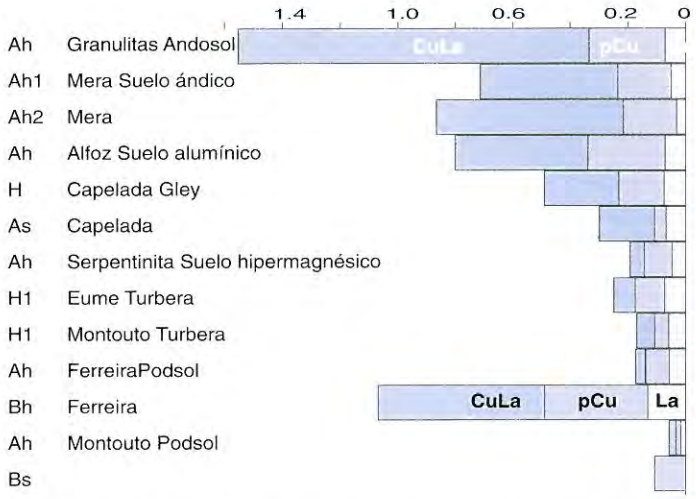


Tendencias de variación de la ClCe según el pH en suelos de Galicia.

2. ESPECIACIÓN DEL ALUMINIO EN LA FRACCIÓN SÓLIDA

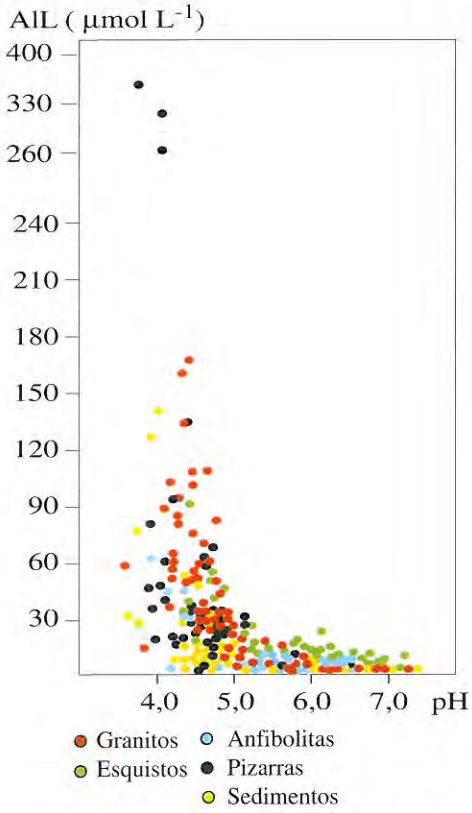


Especiación del Al en la f. sólida de los perfiles P1, P6 y P8 (en cada fracción se representa el valor absoluto, sustrayendo especies más lábiles)

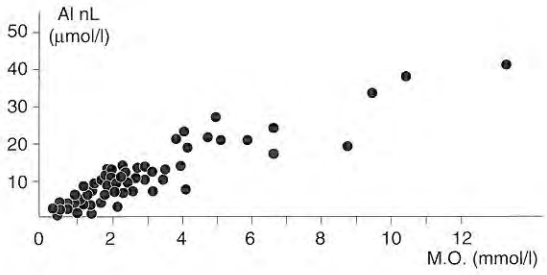


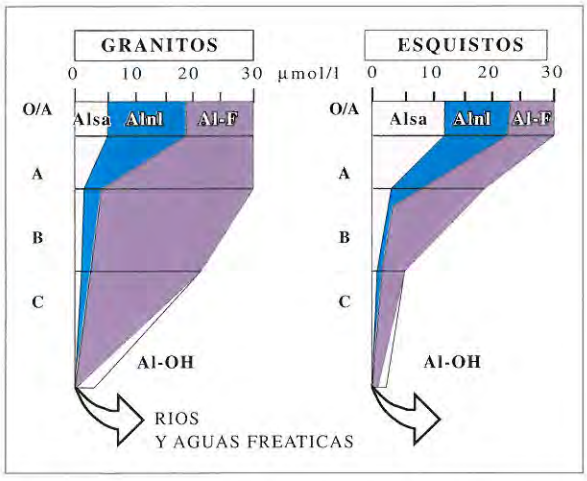
Fraccionamiento del Al extraído con Na-pirofosfato (extracciones con CuCl2 y LaCl3).

3. ALUMINIO EN LA DISOLUCIÓN

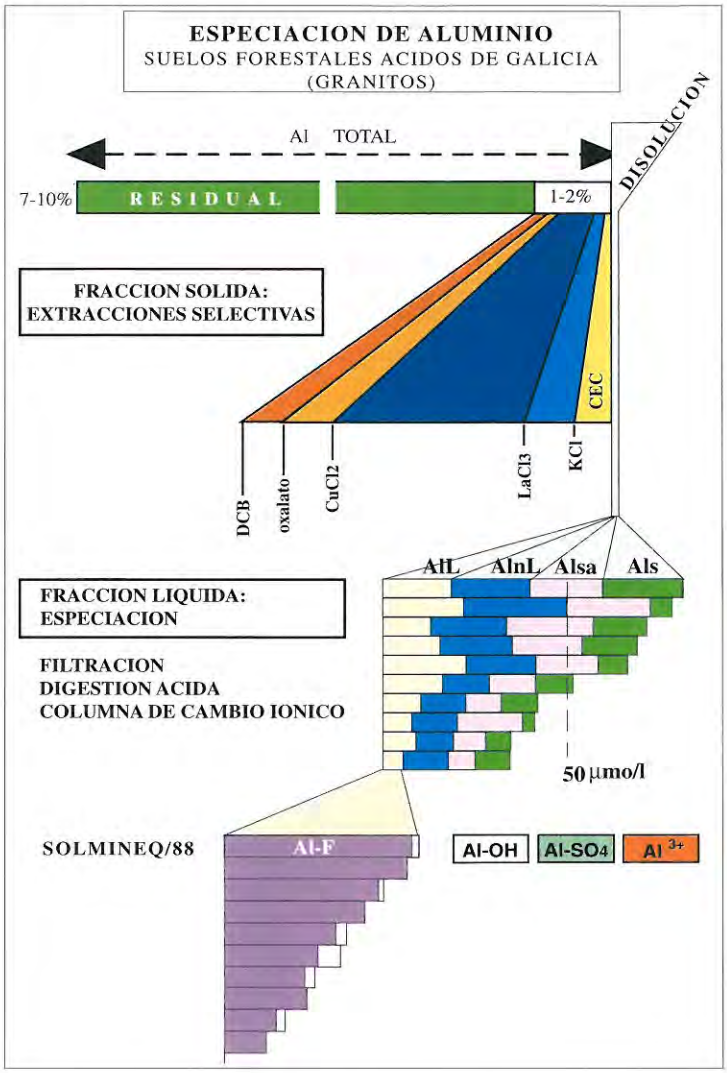


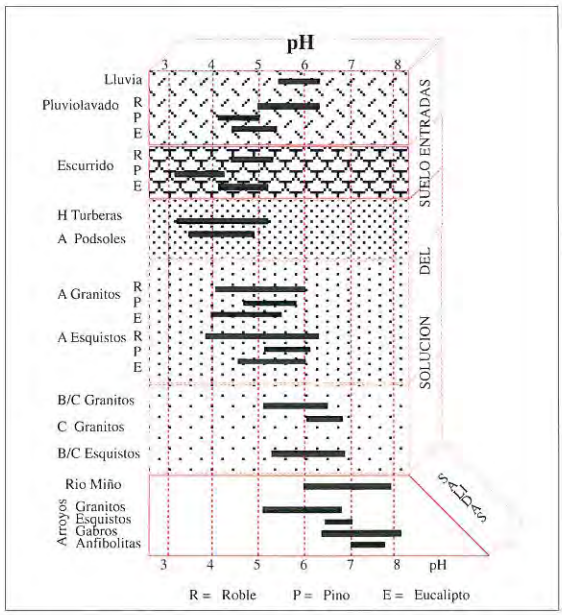
Relación entre Al Labil y pH en las disoluciones del suelos de Galicia.





Variación con la profundidad de las formas de Al en disolución de sistemas edáficos de Galicia (Alvarez Rodriguez y Calvo de Anta.,1992)

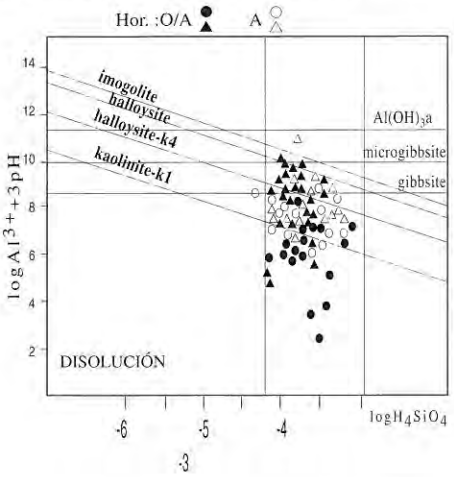


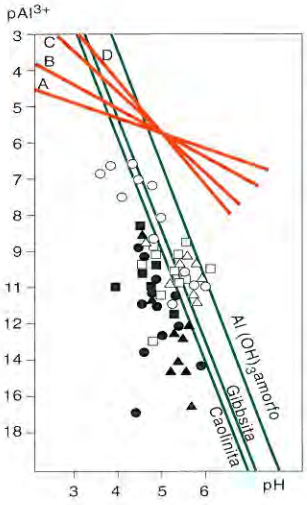


Esquema -resumen de la evolución del pH de las disoluciónes de entradas y salidas de los sistemas edáficos de Galicia (Calvo de Anta, 1992)

4. Al - EQUILIBRIOS TERMODINÁMICOS

HORIZONTES SUPERFICIALES



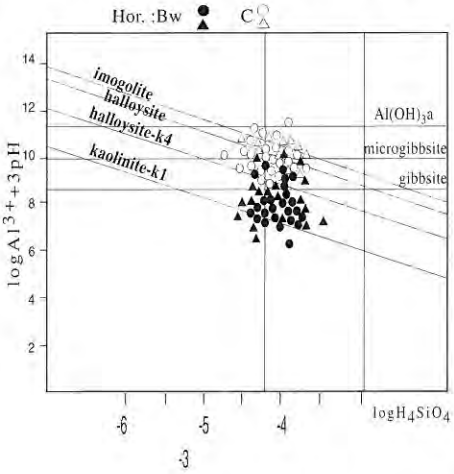


Horizontes humíferos: Actividad del Al^{3+} en horizontes O/A y A bajo diferentes tipos de vegetación. (A,B,C,D: solubilidad de materiales húmicos de suelo con diferente relación C/Al según Cronan et al., 1986.)

ESQUISTOS
- ○ Roble
- △ Pino
- □ Eucalipto

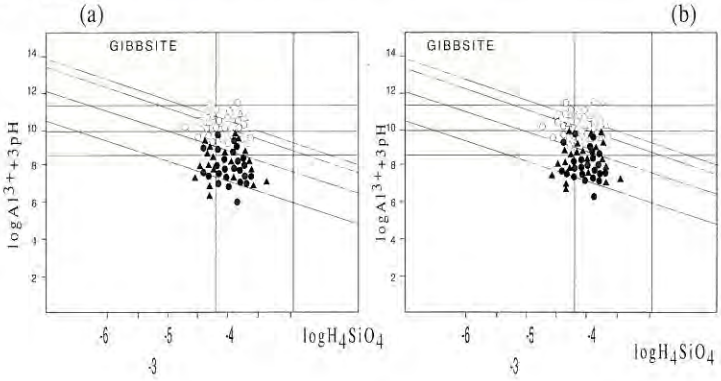
GRANITOS
- ● Roble
- ▲ Pino
- ■ Eucalipto

HORIZONTES SUBSUPERFICIALES

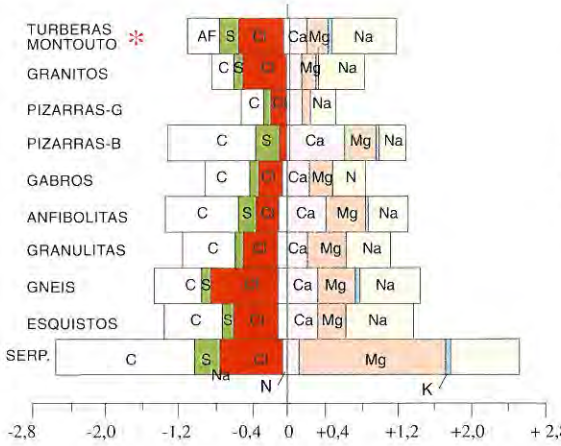


Granitos ● ○ Esquistos ▲ △

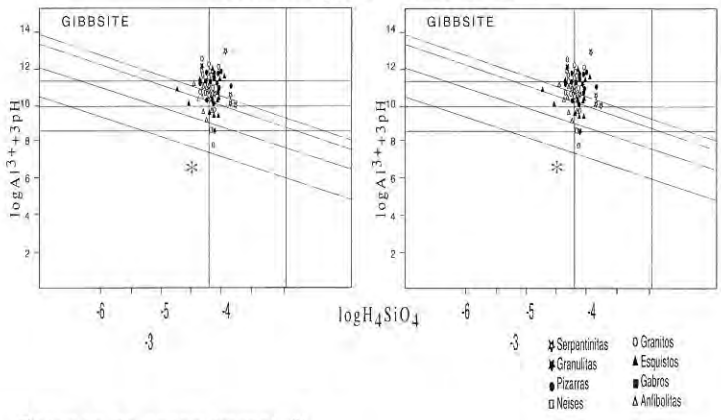
Diagramas de equilibrio del sistema SiO2-Al2O3-H2O de fases estables y metaestables: Composición de disoluciones de suelos de Galicia. (a,b): equilibrios gibbsita-caolinita de diferente cristalinidad (K4 y K1)(datos termodinámicos: gibbsita, May et al., 1979; microgibbsita, Hem y Roberson, 1967; Al (OH)3-amorfo, Sarazin, 1979; caolinitas (K1-K4), Kittrich, 1966; Haloisita, Busenberg, 1978; imogolita, Aurousseau et al., 1987) (Calvo Anta y Macías, 1992).



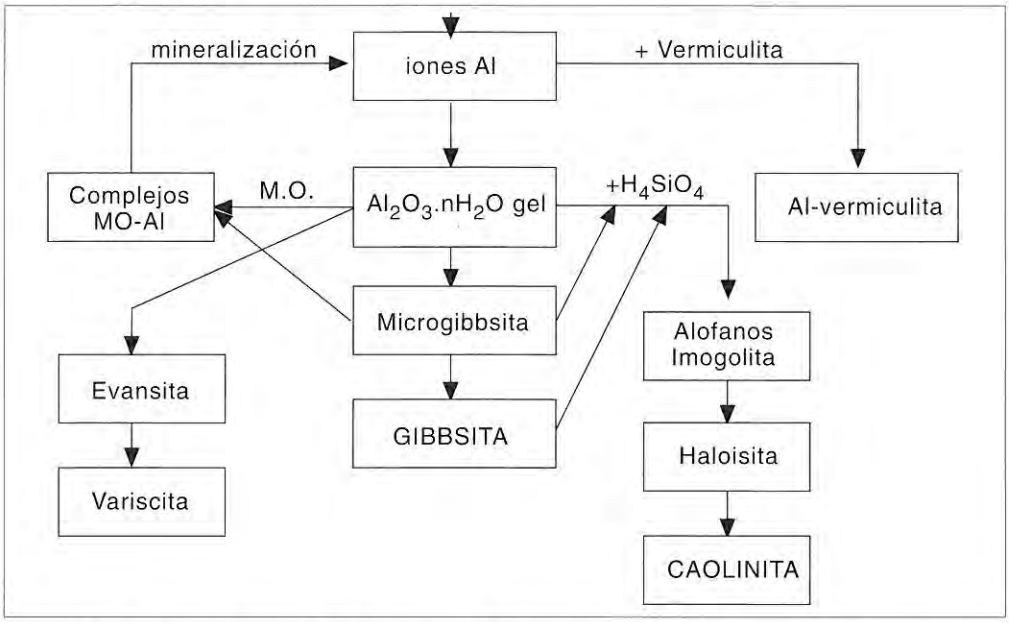
AGUAS FLUVIALES



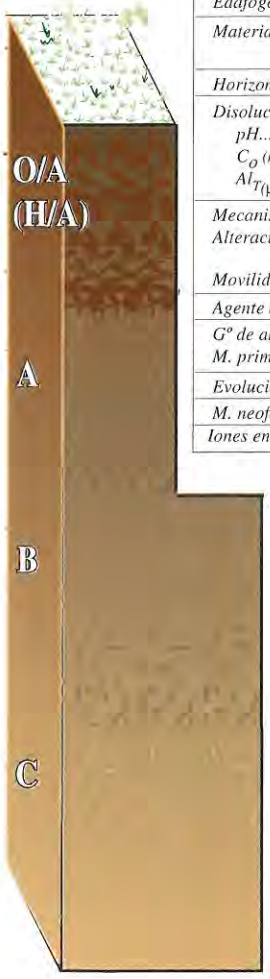
Idem en aguas fluviales de Galicia



5. CARACTERIZACIÓN EDAFOGEOQUÍMICA



Síntesis de las posibles vías de evolución del Al y neoformación de minerales secundarios en suelos de Galicia

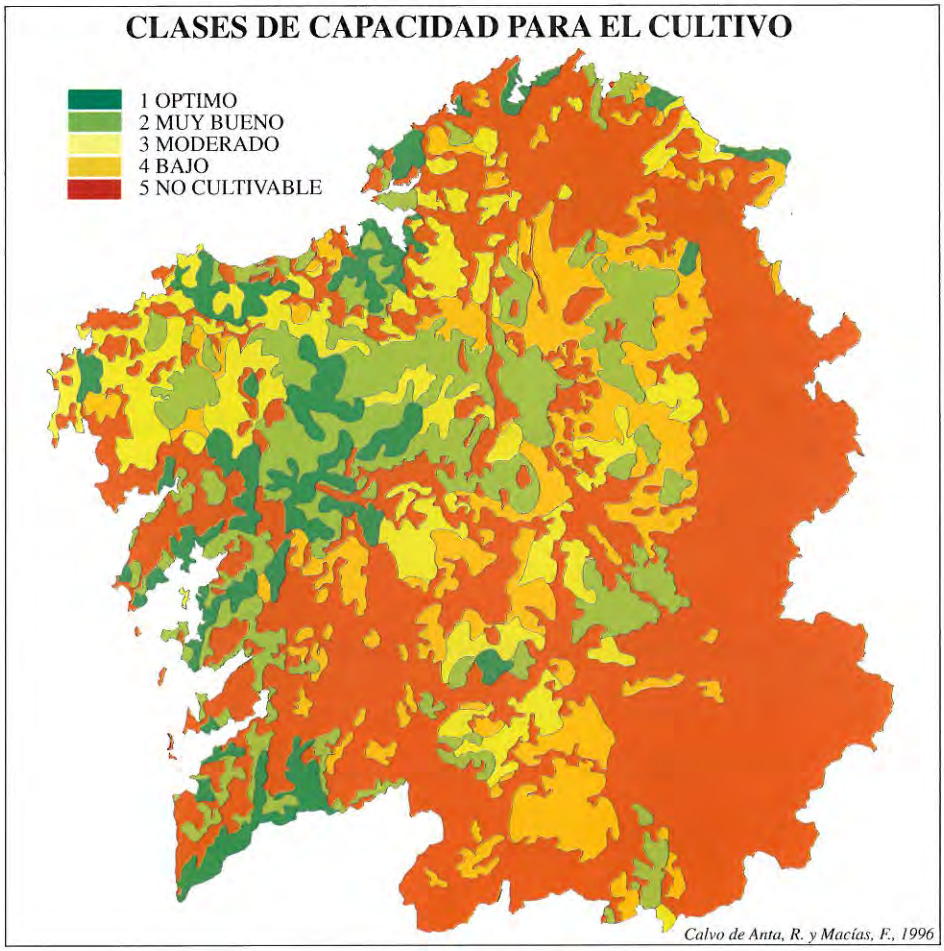


Proceso Edafogeoquímico	ALUMINOSIALITIZACION	ANDOSOLIZACION	PODSOLIZACION	TURBERIZACION
Material original	M. Graníticos, pizarras Q-Esquistos, Rocas Básicas	Rocas Básicas	Areniscas, Cuarcitas Sedimentos cuarzosos	Restos Orgánicos
Horizonte	A	A/R, AB/R	A, E	H
Disolución del suelo				
pH.....	4.8 (4.0-6.1)	5.3(4.6-6.0)	4.1(3.5-6.5)	3.5-5.5
C_O *(mmol/L)*	0-3	0-3	1-13	10-40
$Al_{T(\mu mol/L)}$	25(10-50)	20(2-40)	70(10-300)	80(10-200)
Mecanismo de Alteración	ACIDOCOMPLEXOLISIS moderada ACIDOLISIS	ACIDOLISIS	ACIDOCOMPLEXOLISIS fuerte	ACIDOCOMPLEXOLISIS
Movilidad	Si>Al,Fe	Si>Al,Fe	Al,Fe>Si	Al,Fe>Si
Agente de ataque	CO_2	CO_2	R-COOH	R-COOH
G° de alteración de M. primarios	Moderada	Incipiente	Intensa	-
Evolución de M.2:1	Degradación y Aluminización	Degradación	Destrucción	-
M. neoformados	Imogolita, Haloisita	Imogolita, Geles de Al	-	-
Iones en CIC principales	Al $(OH)^{3-x}$	Al $(OH)^{3-x}$	Al^{3+},H^+	Al^{3+}, Al $(OH)^3$, H^+

Proceso Edafogeoquímico	MONOSIALITIZACION poco evolucionada	MONOSIALITIZACION intensa	FERBISIALITIZACION +FERMONOSIALITIZACION
Material original	M. Graníticos, pizarras Esquistos, Rocas Básicas	Rocas Básicas Esquistos biotíticos	Serpentinitas
Horizonte	B, C	B, C	Bg, Cg, Cr
Disolución del suelo			
pH.....	5.2 (4.7-6,2)	4.9 (4.7-5.4)	7.7 (7.6-8.0)
C_O *(mmol/L)*	-	-	-
$Al_{T(\mu mol/L)}$	7(3-35)	3(2-8)	1.0(0.2-5)
Mecanismo de Alteración	ACIDOLISIS HIDROLISIS	ACIDOLISIS HIDROLISIS	HIDROLISIS
Movilidad	Si>Al,Fe	Si>Al,Fe	Si>Al,Fe
Agente de ataque	CO_2	CO_2	CO_2
G° de alteración de M. primarios	Moderada	Intensa-Total	Incipiente-Moderada
Evolución de M.2:1	Degradación	Destrucción	Neoformación
M. neoformados	Gibsita, Haloisita	Caolinita, Goethita	Esmectita, Haloisita
Iones en CIC principales	Al $(OH)^{3-x}$	Al $(OH)^{3-x}$	Mg^{2+}

Caracterización edafogeoquímica de los suelos de Galicia (Macías y Calvo de Anta , 1992)

CAPACIDAD AGRONOMICA DE LOS SUELOS DE GALICIA



DELIMITACION DE AREAS POTENCIALMENTE CULTIVABLES DE GALICIA

Propuesta metodológica realizada a partir del esquema de Buol et al., (1975) para la determinación de las Clases de Capacidad para el cultivo (Macías y Calvo de Anta, 1992)

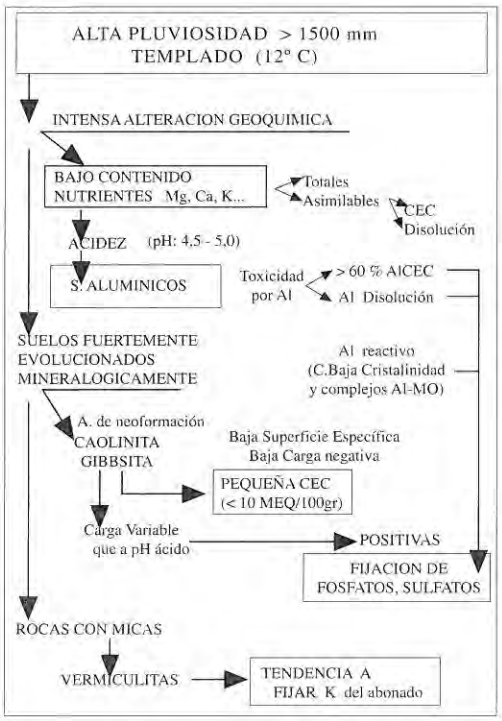
Zonas no aptas para el cultivo	Los aspectos contenplados son (uno o más) siempre que no puedan recuperarse a coste compensble: ➢ Pendientes >13% ➢ Areas con dominio de contactos líticos dentro de los 50 cm superficiales ➢ >25 % de afloramientos rocosos ➢ 35% de pedregosidad (>15 cm) ➢ Areas urbanas, industriales, de infraestructura, protegidas por la ley... etc ➢ Zonas sometidas a inundación en épocas de crecimiento activo de las plantas ➢ Suelos desarrollados sobre materiales serpentínicos ➢ Areas degradadas por actividades mineras. erosión... ➢ Areas afectadas por heladas tardías o con < de 5 meses libres de heladas ➢ Intensidad bioclimática media <6.5 ubc ➢ Más de 90 días acumulativos de déficit de humedad (o más de 60 días consecutivos) durante el periodo vegetativo activo) ➢ Valores extremos de acidez o basicidad (pH <4 o >8.5) ➢ Textura fuertemente desequilibrada ➢ Estructura particular o masiva muy densa ➢ Suelos alcalinos o con salinidad ≥8 mmhos/cm
Areas Cultivables-C4	Son suelos potencialmente cultivables pero que presentan limitaciones de muy difícil modificación. Los aspectos contemplados son (uno o más): ➢ Pendientes 9-13% ➢ Intensidad bioclimática baja (9.5-6.5 ubc) y ≤10 meses libres de heladas; o IBC:9.5-12.5 ubc y < 8 meses libres de heladas, con alta probabilidad de presencia de heladas tardías. ➢ Afloramientos rocosos en 10-25% de la superficie ➢ Textura arenosa ➢ Una combinación de los factores intrínsecos e, x, i, $s_{moderado}$, v de muy difícil modificación o una baja facilidad al laboreo (grupo V)

Areas Cultivables-C3	Suelos cultivables con limitaciones modificables (de elevado coste) Se incluyen áreas distintas de C4 por una o más de: ➢ Pendientes entre 6-9% ➢ Profundidad efectiva < 1 m ➢ Pedregosidad entre 15-35% ➢ Déficit de humedad subsanable a alto costo ➢ Fuerte riesgo de erosión ➢ Una combinación de factores tales como g, a, X_2, v moderado, K, b... ➢ Facilidad de laboreo grupo II-IV
Areas Cultivables-C2	Limitaciones fácilmente modificables a un nivel de manejo medio (en la zona)
Areas Cultivables-C1	Deben cumplir: ➢ Pendientes < 6% ➢ Sin afloramientos rocosos ➢ Sin pedregosidad ➢ Textura equilibrada ➢ Sin déficit de humedad ni hidromorfía ➢ <20% Al en el CICe ➢ Sin o muy bajo riesgo erosión ➢ Sin riesgos de inundación ➢ Facilidad de laboreo de tipo I ➢ Sin fijación o muy escasa fijación de P ➢ Escaso déficit de Ca o Mg ➢ Sin caliza activa ➢ > 1 m de profundidad efectiva ➢ Muy escaso riesgo de heladas tardías ➢ Ausencia de salinidad ➢ Sin problemas estructurales (difícil acceso a la mecanización, tamaño de parcela,...etc)

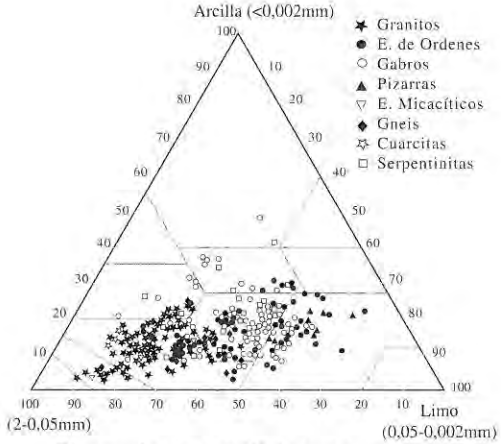
Factor(muestras)	Pizarras (16)	Granitos (114)	Esquistos (132)	Anfibolitas (23)	Gabros (28)	Serpentinitas (36)
Textura C.A.	L	S	L	L	L	L
e (baja CIC)	4	8	24	23	19	6
a (carácter álico)	81	69	38	43	19	0
h (acidez moderada)	100	92	86	91	88	33
P (déficit de P)	94	93	89	95	95	96
X_1(alta fijación de P)	6	12	29	64	39	4
X_2(moderada fijación de P)	27	53	73	86	89	8
k_1 (déficit de K)	44	68	45	68	46	71
k_2(desequilibrio K/S)	0	4	2	23	4	25
k_3 (fijación de K)*	F	F	F	O	O	-
Mg_1 (déficit de Mg)	94	68	73	56	39	3
Mg_2 (Ca/Mg>50)	0	0	0	0	0	0
Ca_1 (déficit de Ca)	81	66	59	61	61	13
Ca_2 (Ca/Mg<0.5)	6	13	12	17	3	32

*: F-frecuente; O-ocasional

Suelos naturales (forestal y monte bajo): frecuencia de aparición de diferentes factores (% de muestras que presentan factor)

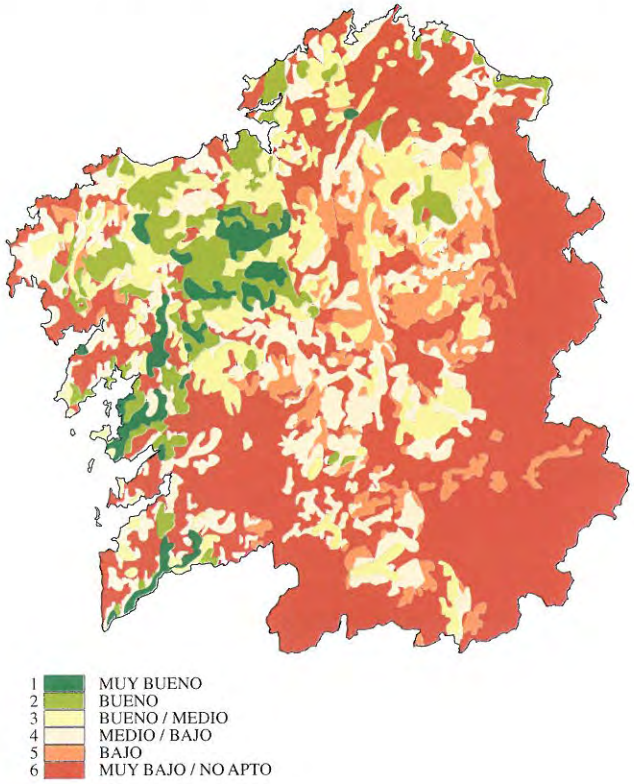


Principales limitaciones físico-químicas de los suelos de Galicia para la producción agronómica (Calvo de Anta et al., 1992)

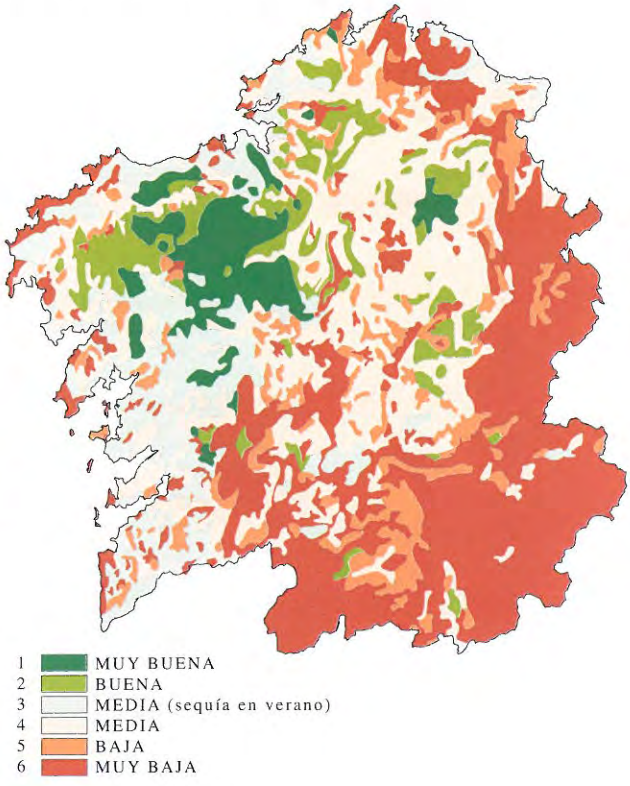


Clases de textura de la capa arable, según material original

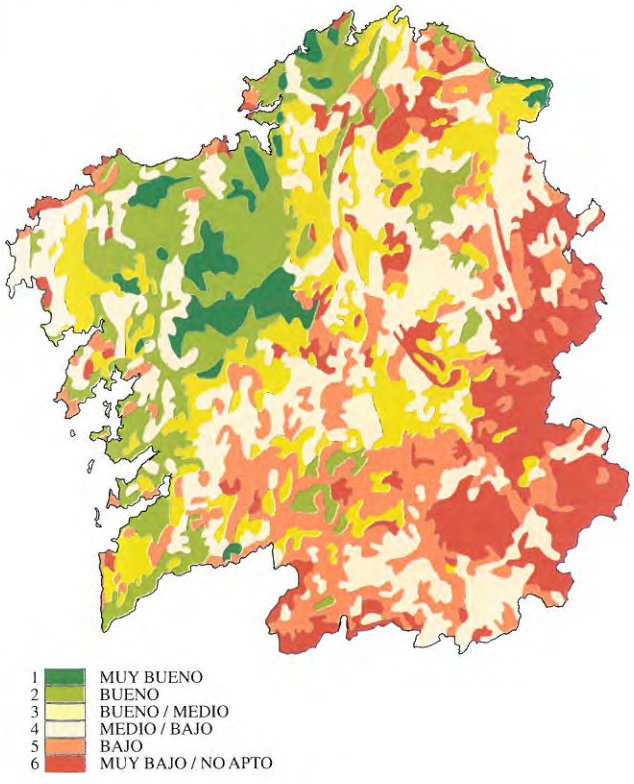
APTITUD PARA CULTIVO DE MAIZ



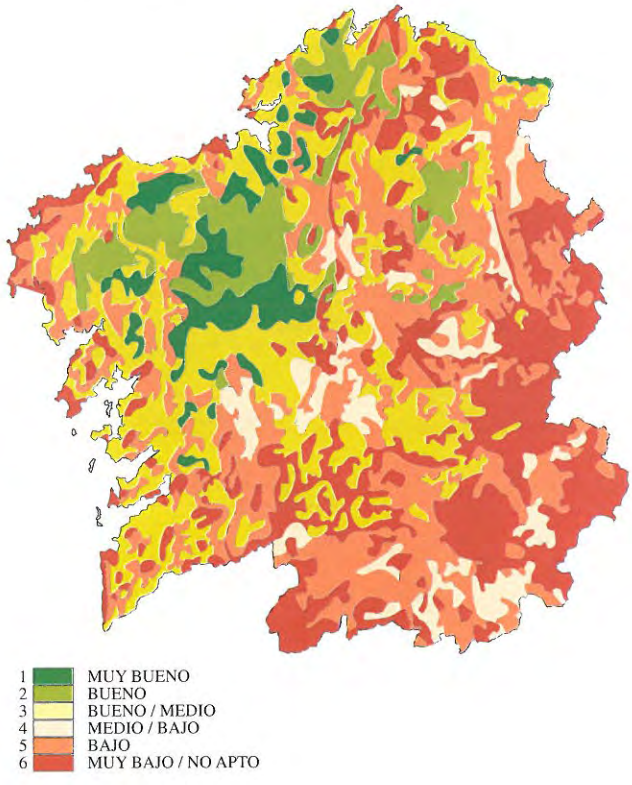
APTITUD PARA PRADERAS IMPLANTADAS



APTITUD PARA PINOS



APTITUD PARA EL CASTAÑO



Mapas de Aptitud del suelo para diferentes usos agronómicos (Macías y Calvo de Anta, 1998)

SUBSECTOR AGRARIO 1996
(millones de ptas) Consellería de Agricultura (1997)

PRODUCCION TOTAL AGRARIA
152.489,4

PFA
73.001,4
48%

REINVERTIDO EN EL SECTOR
79.481,1
52%

	A CORUÑA	LUGO	OURENSE	PONTEVEDRA	GALICIA
Cereales	704,7	890,6	178,0	209,6	1.982,9
Leguminosas	1.580,2	1.560,6	268,0	295,8	3.705,2
Patata	5.440,2	2.103,3	2.122,2	3.822,7	13.488,4
Forraje	*	*	*	*	*
Prados/pastos	*	*	*	*	*
Huerta	3.043,2	560,7	2.447,7	11.324,5	17.376,1
Cítricos	45,9	*	0	433,7	479,6
Fruta (no cítricos)	892,4	614,1	397,9	2.056,4	3.960,8
Vino y subproductos	845,9	3.521,0	6.855,5	12,725,8	23.948,2
Flores y Pl. ornamentales	4.525,8	127,8	312,2	2.835,6	7.801,4
Semillas selectas yPiés	0	0	140,4	34,6	175,0
Otros	...	...	...	...	...
TOTAL (PFA)	17.078,3	9.378,1	12.722,5	33.822,5	73.001,4

SUBSECTOR FORESTAL
1996
(millones de ptas)
PTA: 39.841,9

PF: 36.760,4
92%

R. S.
8%

	A CORUÑA	LUGO	OURENSE	PONTEVEDRA	GALICIA
Coniferas	5.273,2	6.202,6	2.328,7	1.570,5	15.374,7
P. pinaster	4.104,2	4.306,5	1.877,5	1.523,8	11.812,0
P. radiata	1.166,3	1.805,0	125,5	45,2	3.142,0
P. silvestris	2,7	89,4	325,7	1,5	419,0
otras	0,0	1,7	0,0	0,0	1,7
Eucalipto	6.266,4	3.506,3	22,2	2.669,1	12.464,0
Quercineas	33,4	704,2	132,8	267,9	1.138,3
Otras frondosas	120,0	167,4	55,6	45,6	388,6
Subprod. forestales	3.106,7	2.542,6	668,7	1.055,6	7.373,6
Otros	...	...	...	...	...
TOTAL	14.799,7	13.131,3	3.220,7	5.608,7	36.760,4

SUBSECTOR GANDEIRO 1996

PRODUCCION TOTAL GANDEIRO: 213.761,0 (millones de ptas)

PFA: 185.306,2 (87%)

R.S:13%

	A CORUÑA	LUGO	OURENSE	PONTEVEDRA	GALICIA
Leche	35.859,3	39.062,5	2.427,3	10.412,7	87.761,8
Vacuno	16.659,8	6.865,3	12.023,5	6.870,6	42.419,0
TOTAL	67.125,9	51.208,4	33.837,2	33.134,8	185.306,2

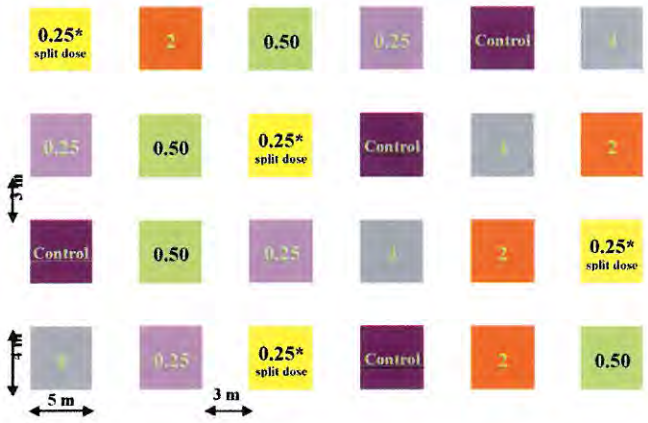
EFECTO DE LA APLICACIÓN DE CALIZA MAGNÉSICA EN DIFERENTES GRANULOMETRÍAS SOBRE ALGUNAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO

E. Viadé, A. Calvo, M.L. Fernández Marcos, E. Alvarez
Dpto. de Edafología y Química Agrícola, Escuela Politécnica Superior. Campus Universitario. 27002 Lugo.

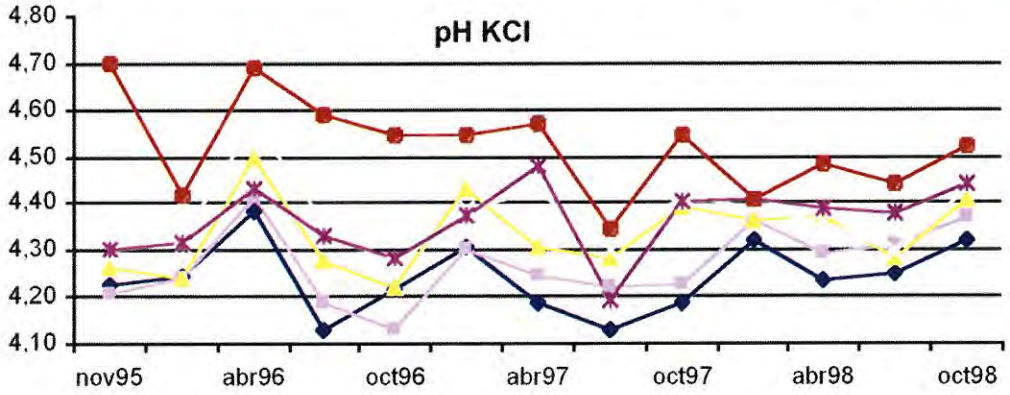
El objetivo de este trabajo es establecer la granulometría más adecuada para el tratamiento con caliza, realizando para ello un estudio comparativo del efecto que presenta esta enmienda añadida en diferentes tamaños de partículas sobre las propiedades del suelo a lo largo de tres años (octubre 95-octubre 98). Los tamaños que se estudian son: entre 4 y 2 mm (tratamiento 4), entre 2 y 0,5 mm (tratamiento 2), entre 0,5 y 0,25 mm (tratamiento 0,5) y menor de 0,25 mm (tratamiento 0,25).

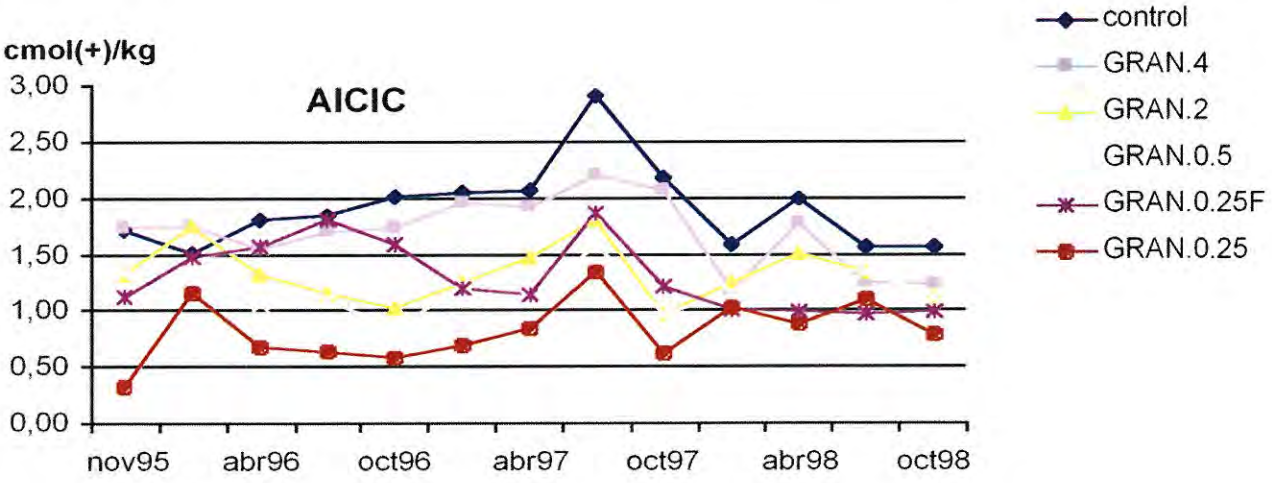
La caliza de un mismo diámetro fue aplicada a cuatro parcelas distribuidas al azar, existiendo además cuatro parcelas control. La caliza de diámetro menor 0,25mm, se aplicó a 4 parcelas en dosis de 3 t ha-1 y a otros 4 en dosis de 1 t ha-1(tratamiento 0,25F), completando en los dos años posteriores las 3 t ha-1. Todas las parcelas fueron sembradas con una mezcla pratense. Se muestran los resultados del pH en KCl, Ca, Mg y Al cambiables (extraídos con NH4Cl 1M), capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe= Ca+Mg+Na+K+Al) y Al reactivo (AlR) determinado en un extracto acuoso (relación 1:10).

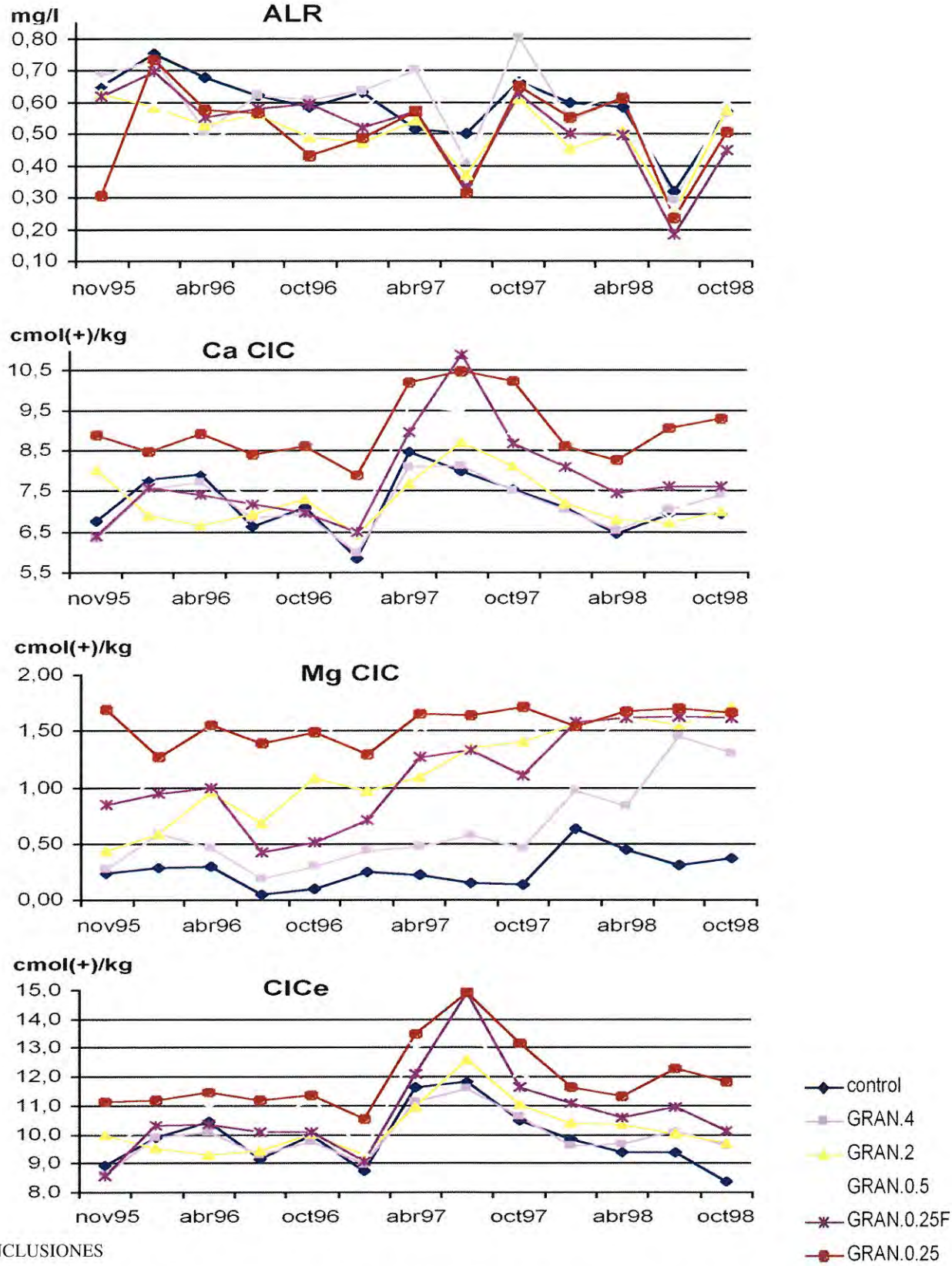
Diseño esperimental



RESULTADOS







CONCLUSIONES

Las parcelas tratadas con la caliza de menor diámetro (< 0,25 mm) son las que presentan, desde el primer muestreo, unos valores de pH más elevados, mayores contenidos de Ca y Mg en el complejo de cambio y el mayor descenso en los valores de Al cambiable en relación con las parcelas control. Este efecto se mantiene a lo largo de los tres años de estudio.

La caliza de mayor grosor (2 a 4 mm, tratamiento 4) posee escasa efectividad a lo largo del período de estudio, manteniendo niveles en los distintos parámetros estudiados similares a la parcela control. Las parcelas tratadas con caliza de granulometría 0,5 a 2 mm, presentan un comportamiento intermedio entre los tratamientos 0,5 y 4.

EFECTO DE LOS FERTILIZANTES DE LIBERACIÓN GRADUAL EN EL CRECIMIENTO EN ALTURA Y DIÁMETRO DE PLANTACIONES DE EUCALIPTO EN GALICIA

B. Santiago, M.L. Fernández Marcos, E. Alvarez
Dpto. de Edafología y Química Agrícola, Escuela Politécnica Superior. Campus Universitario. 27002 Lugo.

Se estudia la dinámica de los fertilizantes de liberación controlada en el suelo y sus efectos sobre la nutrición de *Eucalyptus globulus*. Para ello se han seleccionado una parcela desarrolladas sobre pizarras en la provincia de Lugo.

Los tratamientos realizados con fertilizantes de liberación controlada fueron:

- E1: 4 pastillas de 5 gramos de 14-9-8 (NPK) por planta.
- E2: 3 pastillas de 5 gramos de 14-9-8 (NPK) por planta.
- E3: 1 pastilla de 20 gramos de 14-9-8 (NPK) por planta.
- E4: 1 pastilla de 40 gramos de 8-16-8 (NPK) por planta.
- E5: 2 pastillas de 48 gramos de 4-14-14 (NPK) por planta.

La parcela se dividió en seis subparcelas distribuidas al azar, constituída cada una por 35 árboles. En cinco de estas subparcelas se aplicaron los distintos tratamientos fertilizantes, a cada uno de los 35 árboles. En la subparcela restante, los árboles no fueron fertilizados, sirviendo como testigos. Los árboles fueron plantados en noviembre de 1997.

Condiciones de la masa. Se midieron alturas totales y diámetros basales en todos los árboles de la parcela, en Abril 98, Agosto 98, Noviembre 98 y Mayo 00.

Estimación de la biomasa en Eucalyptus globulus.
La biomasa, tanto total como foliar, para *Eucalyptus globulus* se ha estimado, considerando las alturas y diámetros basales medios del muestreo realizado dos años y medio después de la plantación, Mayo 00. Esta biomasa se estimó considerando la fórmula dada por Reed y Tomé (1997) para plantaciones de *Eucalyptus globulus* de uno a tres años de edad, en el centro de Portugal.

Crecimiento de los árboles

Altura:

Muestreos	Secuencias tratamientos
Abril 98	$E1^{a}>E2^{a}>E3^{ab}>E5^{bc}>control^{bc}>E4^{c}$
Agosto 98	$E4^{a}>E1^{b}>E2^{b}>E3^{b}>E5^{b}>control^{c}$
Abril 99	$E4^{a}>E1^{b}>E2^{b}>E5^{b}>E3^{b}>control^{b}$
Mayo 00	$E1^{a}>E4^{a}>E2^{a}>E5^{ab}>E3^{ab}>control^{b}$

Diámetro basal:

Muestreo	Secuencia de tratamientos
Abril 98	$E1^{a}>E2^{ab}>control^{bc}>E3^{bc}>E4^{c}>E5^{c}$
Agosto 98	$E4^{a}>E1^{ab}>E2^{ab}>E3^{b}>E5^{b}>control^{c}$
Abril 99	$E4^{a}>E2^{ab}>E1^{ab}>E5^{b}>E3^{b}>control^{c}$
Mayo 00	$E4^{a}>E1^{a}>E2^{a}>E5^{a}>E3^{a}>control^{b}$

*letras distintas señalan diferencias significativas para $p<0,05$.

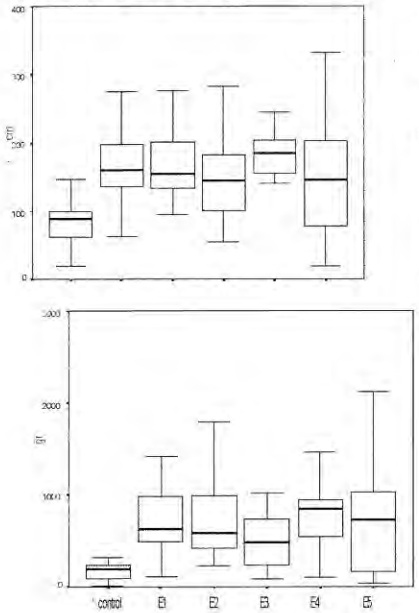
Correlaciones entre altura y parámetros de hoja y de suelo.
Regresiones entre la altura (cm) y diferentes parámetros minerales en hoja para los distintos muestreos

	Ecuación	r
Abril 98	Altura=-0,250+15,37P foliar	0,854
Agosto 98	Altura=5,759+6,196K foliar	0,944
Abril 99	Altura=116,445-72,585 P_{foliar}+17,177 Ca_{foliar}	0,974
Mayo 00	-	-

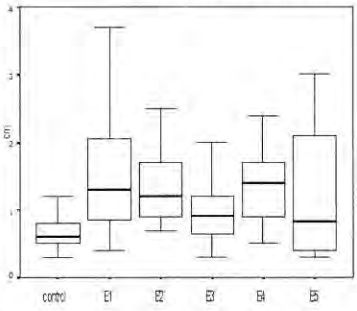
Regresiones entre la altura (cm) y diferentes parámetros del suelo para los distintos muestreos.

	Ecuación	r
Agosto 98	Altura=126,887+180,639N-1,443Al(%)	0,998
Abril 99	-	-
Mayo 00	Altura=-20,327+526,566N	0,882

ALTURA MAYO 2000



DIAMETRO BASAL MAYO 2000



Producción de biomasa total dos años y medio después de la plantación

Correlaciones entre diámetro basal y parámetros de hoja y de suelo.

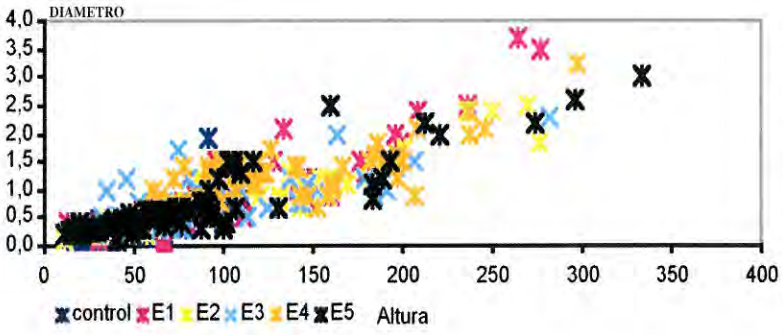
Regresiones entre el diámetro basal (cm) y diferentes parámetros minerales en hoja para los distintos muestreos.

	Ecuación	r
Abril 98	Diámetro basal=0,161+0,038K foliar-0,05425Mg foliar	0,996
Agosto 98	Diámetro basal=0,127+0.0494K foliar	0,932
Abril 99	D basal=-2,503+1,272Mg foliar+0,746N	0,997
Mayo 00	-	-

Regresiones entre el diámetro basal (cm) y diferentes parámetros de suelo para los distintos muestreos

	Ecuación	r
Agosto 98	Diámetro basal=0,08105+1,354N+Mg cambiable	0,990
Abril 99	-	-
Mayo 00	Diámetro basal=- 0,641+5,778N	0,945

Relación entre la altura (cm) y el diámetro basal (cm) en Eucalyptus globulus (r= 0.96, p<0.01).



CONCLUSIONES

El tratamiento 4 (1 pastilla de 40 grs. de 8-16-8) da lugar a los mayores contenidos totales de calcio, magnesio, potasio y nitrógeno en hoja. Parece observarse una falta de respuesta al aporte de fósforo.

La aplicación de los fertilizantes produjo diferencias significativas en el crecimiento en altura y diámetro basal, presentando los mayores crecimientos los árboles tratados con el tratamiento 4 (1 pastilla de 40 grs. de 8-16-8) y 1 (4 pastillas de 5 grs. de 14-9-8).

El fósforo, potasio y calcio foliares, el nitrógeno total contenido en el suelo y el porcentaje de saturación de aluminio explican un alto porcentaje del crecimiento en altura en *Eucalyptus globulus*. El potasio foliar y el nitrógeno total del suelo, además del magnesio foliar y el magnesio en el complejo de cambio explican un alto porcentaje de la varianza de crecimiento en diámetro basal. Los crecimientos en altura y diámetro basal se correlacionan con diferentes parámetros según el período de estudio, debido a que las exigencias del árbol van cambiando a con el desarrollo del vegetal

La biomasa total en la parcela control de *Eucalyptus globulus* es significativamente menor que la obtenida en las parcelas fertilizadas, siendo el tratamiento 4 (1 pastilla de 40 grs. de 8-16-8) el que da lugar a una mayor biomasa total.

DE RESIDUOS A RECURSOS: SOLUCIONES AMBIENTALES Y AGRONÓMICAS A LA APLICACIÓN DE RESIDUOS GANADEROS Y AGROINDUSTRIALES

Mª Elvira López Mosquera, Emilio Carral Vilariño, Mª Jesús Sainz Osés, Socorro Seoane Labandeira, Adolfo López Fabal
Escola Politécnica de Lugo. Universidad de santiago

1. APLICACIÓN DE LODOS DE INDUSTRIA LÁCTEA EN TERRENOS AGRÍCOLAS

- **Caracterización del lodo** (composición, valor fertilizante, contenido en metales pesados, etc)

- **Establecimiento del perímetro de vertido** (sistema de información geográfica donde se incluye extensión, localización, historial técnico, aptitud de cada parcela para recibir lodos, etc)

- **EVALUACIÓN DE SU PODER FERTILIZANTE A TRAVÉS DE DISTINTOS ENSAYOS:**

  * Abonado de mantenimiento en praderas en comparación con abonado mineral
  * Abonado de establecimiento en transformación de monte a pradera
  * Búsqueda de dosis más adecuadas
  * Aplicación en sistemas silvopastorales

(En todos ellos se estudian las modificaciones producidas a nivel de suelo, a producción, composición botánica, composición mineral e influencia en la micorrización).

- **Evaluación de riesgos** (salinidad, metales pesados)

2. TRANSFORMACIÓN DE ESTIÉRCOL DE POLLO DE ENGORDE EN ABONO ORGÁNICO COMERCIAL (BIOF-1)

- **CARACTERIZACIÓN DEL ESTIÉRCOL DE POLLO EN FRESCO Y UNA VEZ TRANSFORMADO EN BIOF-1.**

- **Ensayos de compostaje** como proceso previo a la deshidratación y granulado del estiércol de pollo

- **Evaluación del valor fertilizante** del estiércol de pollo transformado (BIOF-1) en distintos cultivos: patata, guisante, lechuga, plantas medicinales, etc)(Modificaciones inducidas en suelo, evaluación de riesgos, producción y calidad de cosecha).

- **ESTUDIO DE LA ADECUACIÓN DEL ABONO BIOF-1 A LA NORMATIVA DE ABONO ECOLÓGICO.**

3. ESTUDIOS PARCIALES SOBRE OTROS SUBPRODUCTOS: ALGAS, CONCHA DE MEJILLÓN, PURÍN DE VACUNO, ETC.

INFLUENCIA DE LOS FACTORES EDÁFICOS Y DEL ESTADO NUTRICIONAL SOBRE LA PRODUCTIVIDAD DE Pinus radiata EN PLANTACIONES DE GALICIA

F. Sánchez-Rodríguez[a], R. Rodríguez-Soalleiro[a], E. Español[b], A. Merino[a]
[a] Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela, E-27002 Lugo.
[b] C. I.F. Lourizán, Consellería de Medio Ambiente, Xunta de Galicia, Apto. 127, E-36080 Pontevedra.

Pinus radiata, con una representación de 81.700 ha, es junto con *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster*, una de las especies forestales más empleadas en repoblaciones forestales de Galicia. Las favorables condiciones climáticas permiten una elevada producción de esta especie, la cual se explota en turnos de corta medianos o cortos. Sin embargo, la producción varía considerablemente entre las diferentes plantaciones y parece estar relacionado con el estado nutricional de los árboles (Bará, 1990), lo que a su vez, está determinado por el tipo de suelo (Gandullo et al., 1974; Gil Sotres et al., 1977; Sánchez-Rodríguez et al., 1998) y la técnica de preparación del terreno para la plantación (Merino y Edeso, 1999). Las relaciones entre el índice de sitio y las características del sitio (principalmente, las propiedades de los suelos y el clima) y el estado nutricional de la masa proporcionan una información útil para la planificación forestal sostenible. El uso de estas relaciones permite la selección de las especies más convenientes y proporciona una predicción del crecimiento esperado bajo unas determinadas condiciones (Carmean 1975).

El objetivo de este estudio fue el de describir la influencia de las propiedades edáficas y de la nutrición sobre la capacidad productiva de *Pinus radiata*. Para este estudio se han seleccionado un total de 47 plantaciones entre 15 y 38 años de edad, localizados sobre suelos desarrolados sobre diferentes materiales de partida (esquistos, rocas graníticas, gabros, anfibolitas y sedimentos. En cada uno de las plantaciones se determinaron los parámetros dasométricos, los que se aplicaron para determinar el Índice de Sitio con las curvas obtenidas por Sánchez-Rodríguez (2000) a partir de 100 plantaciones. Las ecuaciones se aplicaron son la de Richards (1959), modificada por Payandeh y Wang (1994). En cada una de las parcelas establecidas se determinó la profundidad del suelo, así como los diferentes parámetros físicos y químicos (textura, materia orgánica, N, pH, elementos de cambio). De igual modo, se tomaron muestras foliares para el análisis de los macro y micronutrientes . La mayor parte de las plantaciones mostraron niveles deficientes de P, Mg y Ca. Las mayores concentraciones foliares de K se observaron en plantaciones sobre rocas graníticas, mientras que los niveles más elevados de Ca, Fe y Zn aparecieron sobre rocas básicas. Los niveles de P, Ca y Mg en hojas se relacionaron moderadamente con los niveles encontrados en los suelos.

El análisis de componentes principales discrimina las plantaciones según determinadas propiedades del suelo influenciadas por el material de partida. El índice de sitio se relacionó positivamente con la profundidad del suelo y el pH, y negativamente con el N del suelo. En cuanto a elementos foliares, índice de sitio se relacionó positivamente con el nivel P y, negativamente, con el de N.

La tabla 1 muestra las ecuaciones de regresión seleccionadas para estimar el Índice de Sitio con las propiedades de suelo y/o los niveles foliares de elementos. Como se muestra, el Índice de sitio se puede estimar sólo con las propiedades del suelo y foliares conjuntamente.

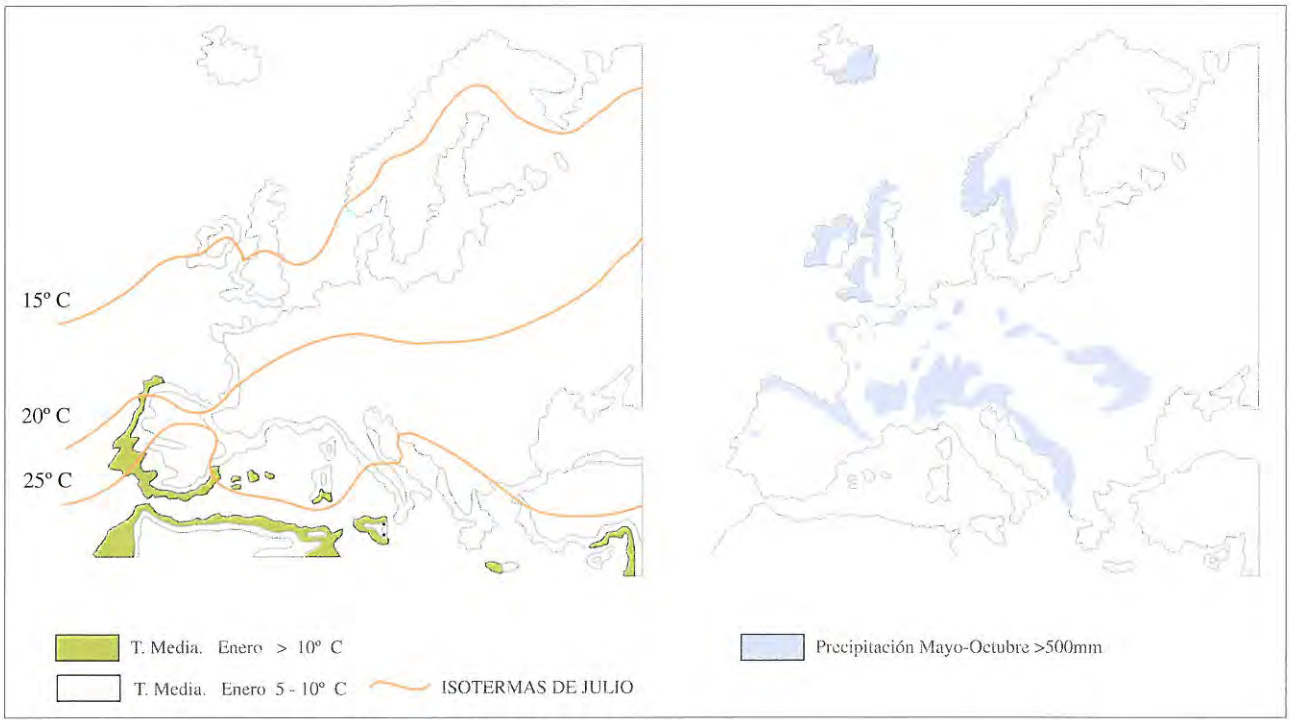
Tabla 1. Regresiones múltiples entre el índice de sitio, propiedades de suelo y concentración foliar de nutrientes.

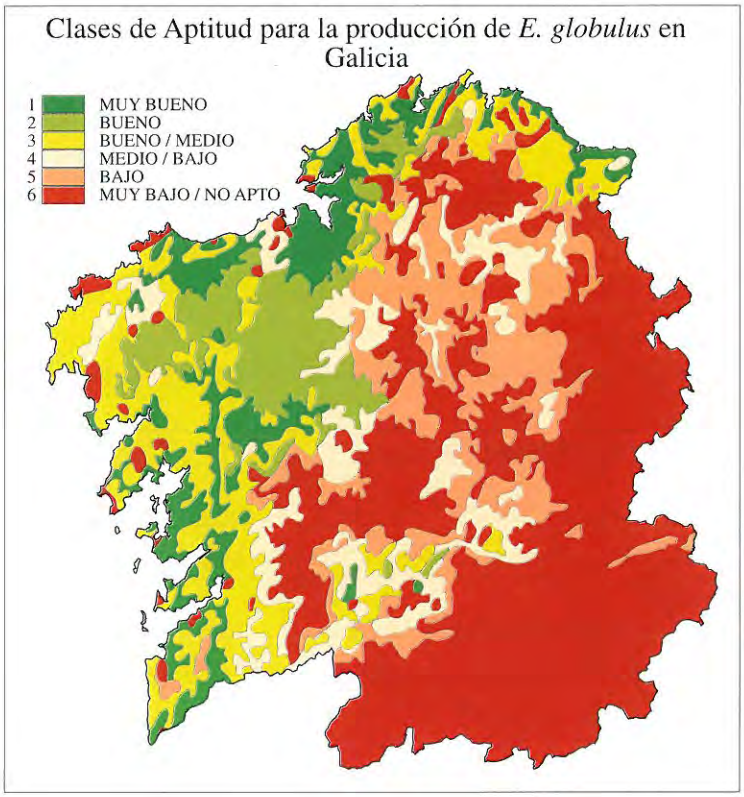
Parcelas	Ecuaciones de regresión	$R^{2(1)}$	$SEE^{(2)}$
	Propiedades de suelo		
Todas las parcelas	(Eq. 1) SI = 3.586 – 9.073Ns + 0.074 D + 0.0388 Ks + 2.951pH	0.62 0.65	1.96 1.92
	Concentraciones foliares		
Todas las parcelas	(Eq. 4) SI = 25.970 – 2.951 N + 55.073 P – 0.273[a]	0.40	2.47
Esquistos y rocas graníticas y prof. de suelo > 40 cm	(Eq. 5) SI= 21.247 – 3.974 N + 45.414 P + 13.604 Ca	0.65	1.77
	(Eq. 6) SI = 23.983 – 3.717 N + 51.464 P + 12.823 Ca –0.149 A	0.70	1.62
	Propiedades del suelo y concentraciones de foliares		
Todas	(Eq. 10) SI = 27.876 – 5.347N –57.355 Mg – 10.130 Ns + 0.067D + 0.130Mgs + 0.028 Ks + 0.084S	0.82	1.42

[1] R^2: Coeficiente de determinación. [2] SEE: Error standard.
Ns: N total del suelo; D: Profundidad del suelo. A: Edad de la plantación. Mgs: Mg de cambio. Ks: K de cambio . S: Contenidop de arena gruesa.

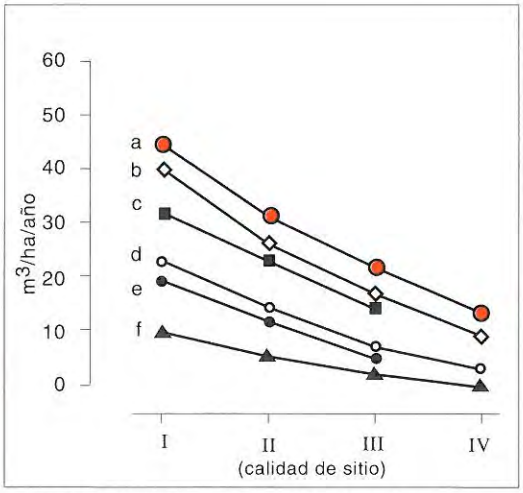
INFLUENCIA DE DIFERENTES ESPECIES FORESTALES SOBRE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN GALICIA

R.Calvo de Anta



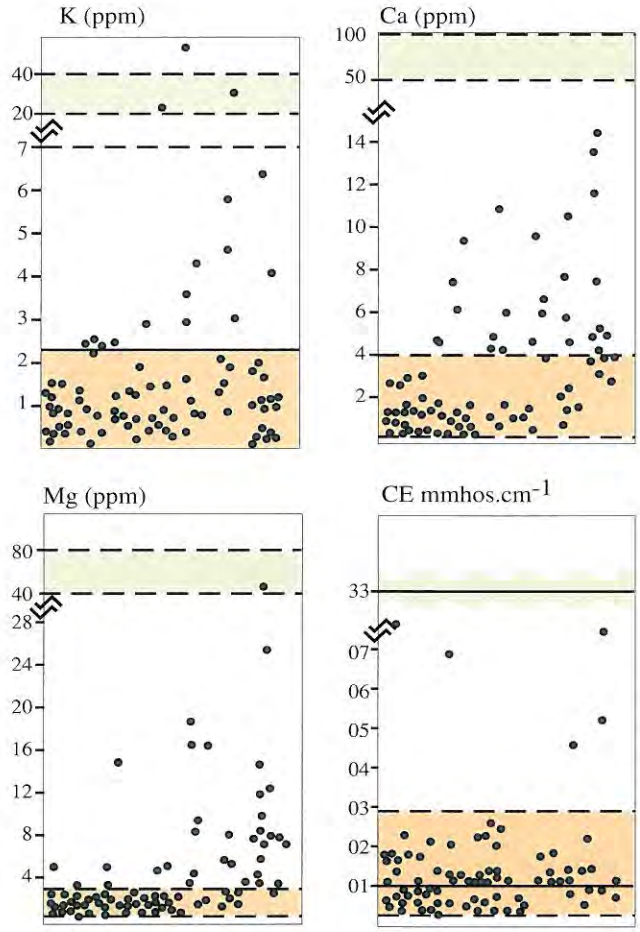


En Calvo de Anta. R., 1992

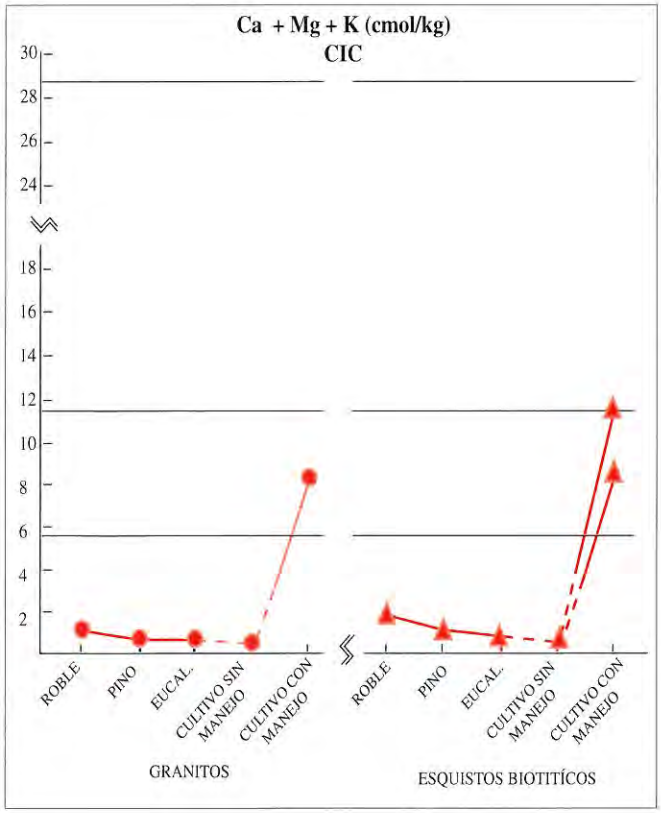


Crecimientgo medio anual de *E. globulus* en diferentes regiones (volumen con corteza; turnos de 12 años)

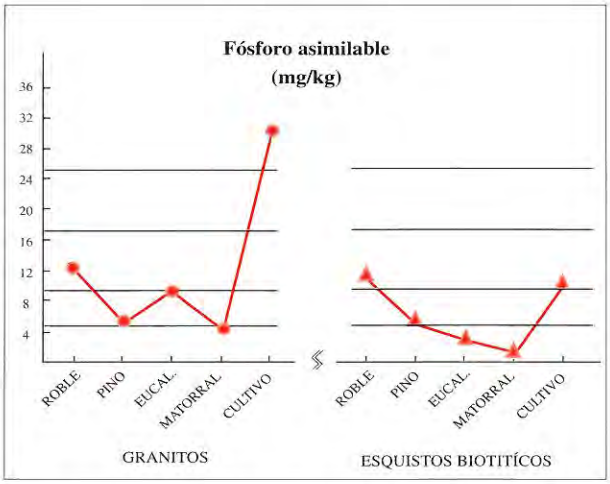
a: Norte de España (Pita Carpenter, 1966)
b: Norte de Portugal (Informe Nac. Portugal)
c: India - Nilgiri (Inf. Nac. y Strets 1962)
d: S.O. de España (Min. de Agricultura)
e: Sur de Portugal (Informe Nac. Portugal)
f: S.O. de España (suelos arenosos)(M. Agricultura)



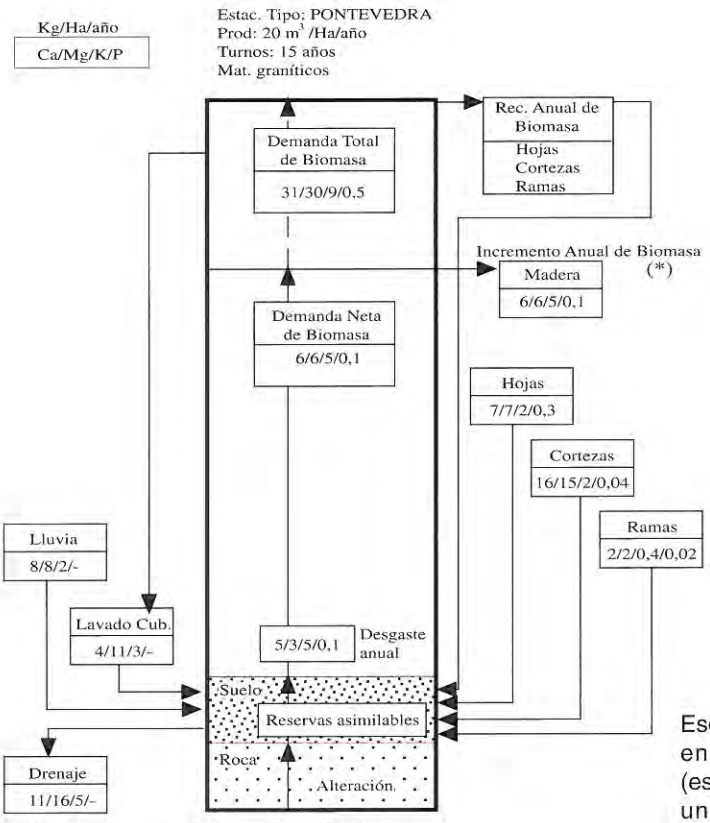
Composición de la disolución de suelos de Galicia en comparación con los campos más frecuentes en ambientes templados y tropicales



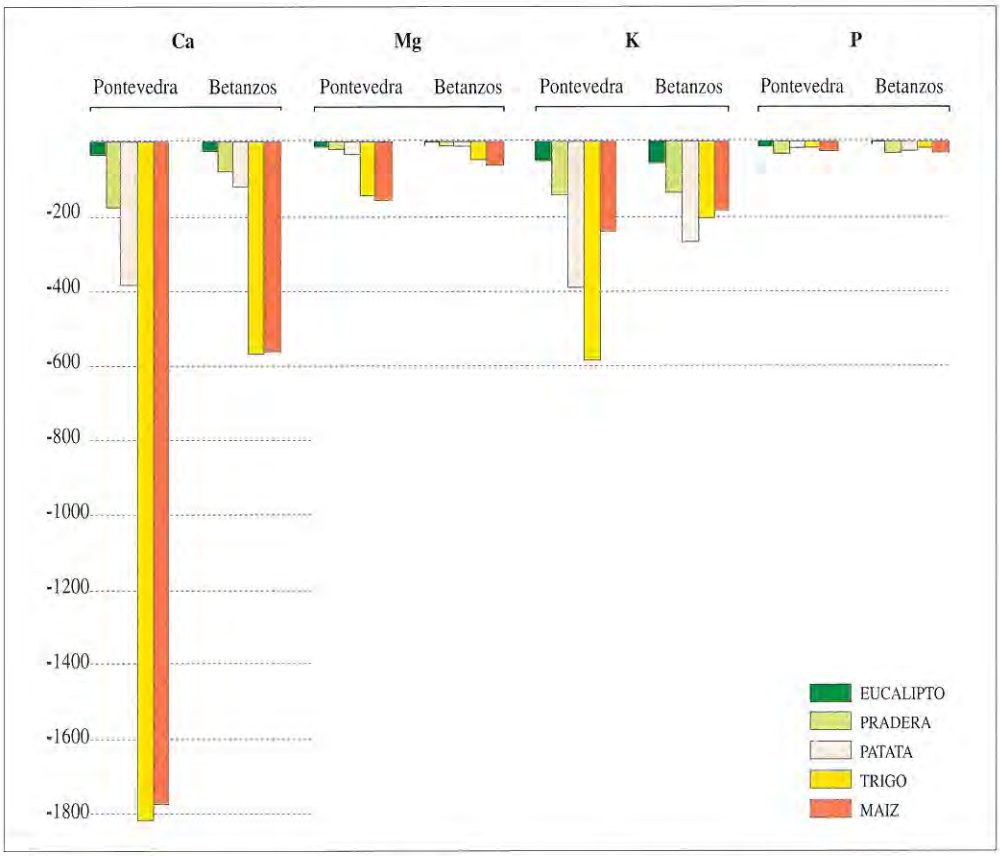
Ca+Mg+K en el CIC de suelos forestales y cultivados de Galicia



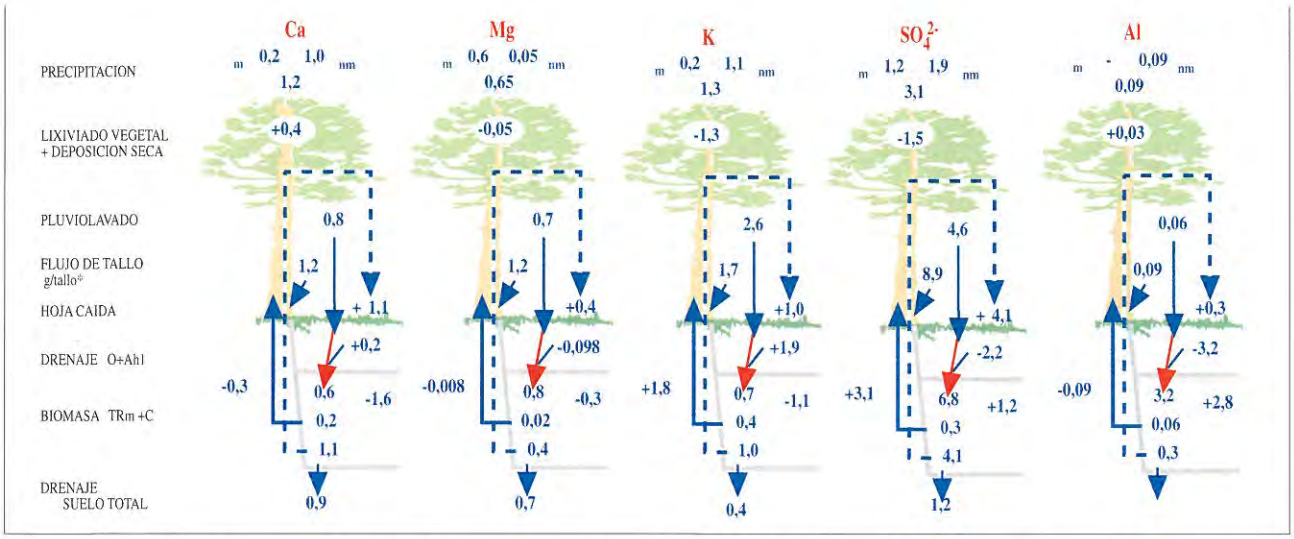
P asimilable en suelos forestales de Galicia



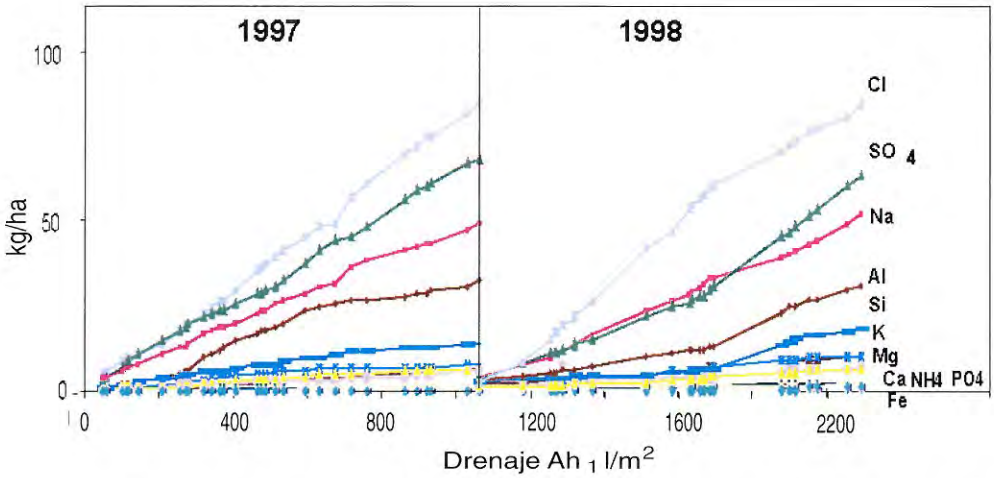
Esquema del ciclo de algunos nutrientes en suelos forestales con eucalipto (estación tipo: pontevedra)(se considera una producción de 20m3 Ha/año)



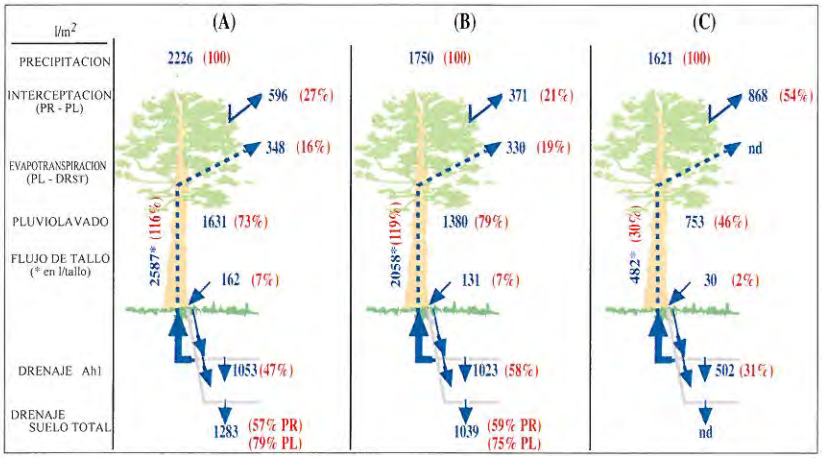
Balance de elementos en suelos con diferentes aprovechamientos; en Galicia (entradas por precipitación, salidas por drenaje y producción de biomasa) en dos estaciones climáticas tipo, Pontevedra y Betanzos (datos en kg/ha/año).



Ciclo del Ca, Mg, K, Al y SO_4^{2-} en Alto do Martelo (año 1997)(Gómez Rey y Calvo de Anta, 2001)

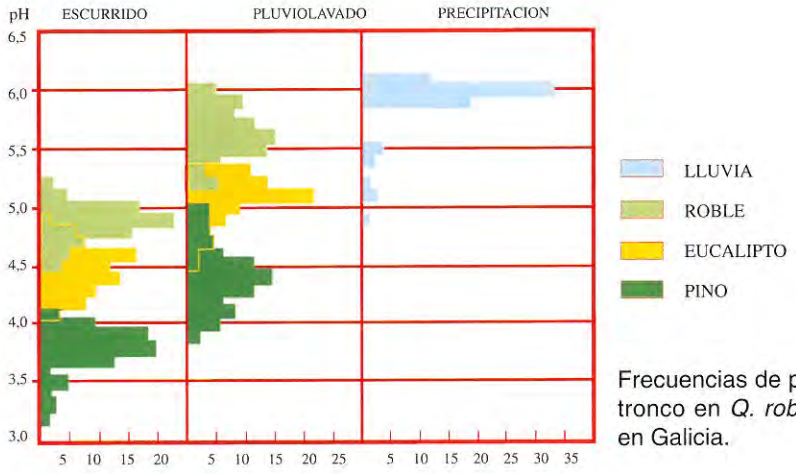


Evolución de las pérdidas absolutas de elementos en hor. A de suelos forestales de Galicia (sistema con P. radiata en Alto do Martelo, enero1997-enero1999)

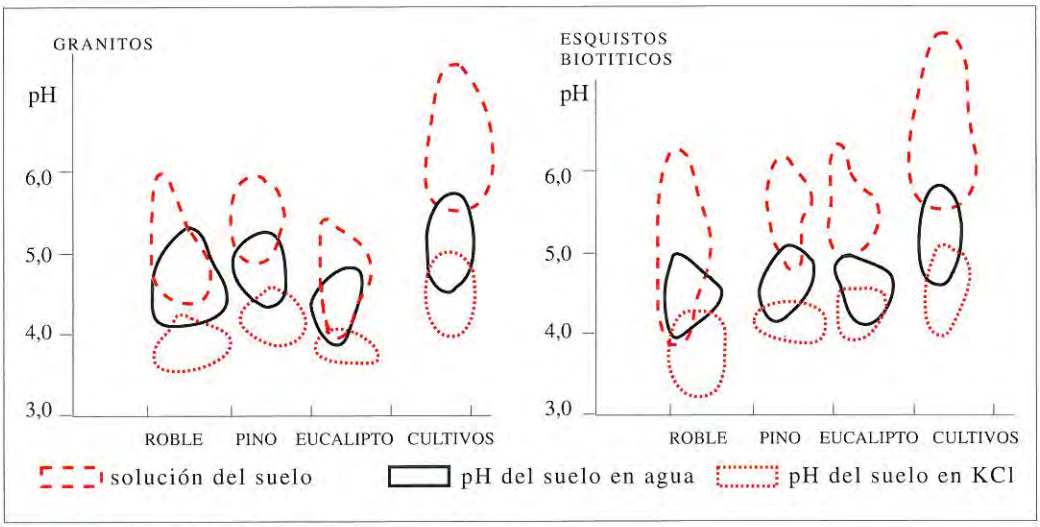


(A) - Año húmedo: >2000 mm (O Martelo y Goente, 1997)
(B) - Año medio: >1700 mm (O Martelo y Goente, 1997)
(C) - Año medio: >1600 mm (Muras 1997 y 1998)

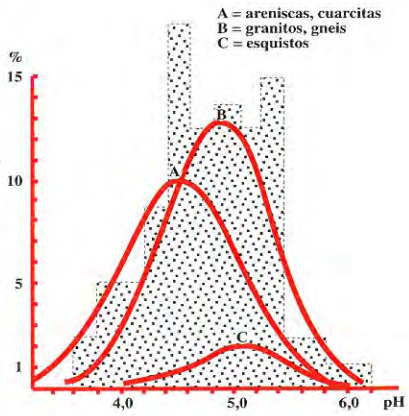
Balance hídrico en sistemas forestales "*tipo*" con *P. radiata* (1997 y 1998)



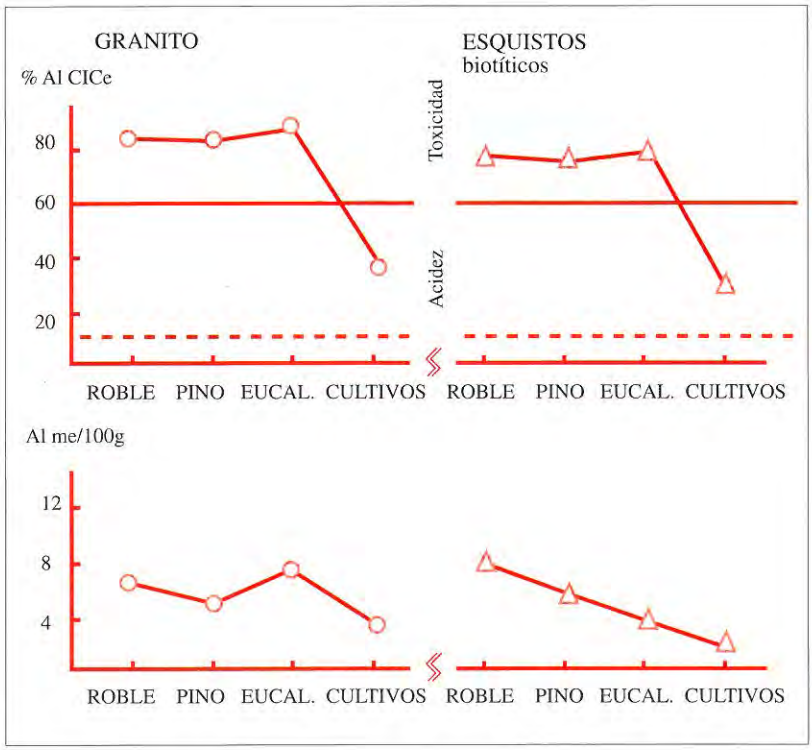
Frecuencias de pH del pluviolavado y flujo de tronco en *Q. robur, P. pinaster y E. globulus* en Galicia.



pH de suelos forestales bajo diferentes cubiertas.



Variación del pH del suelo sobre diferentes materiales geológicos.

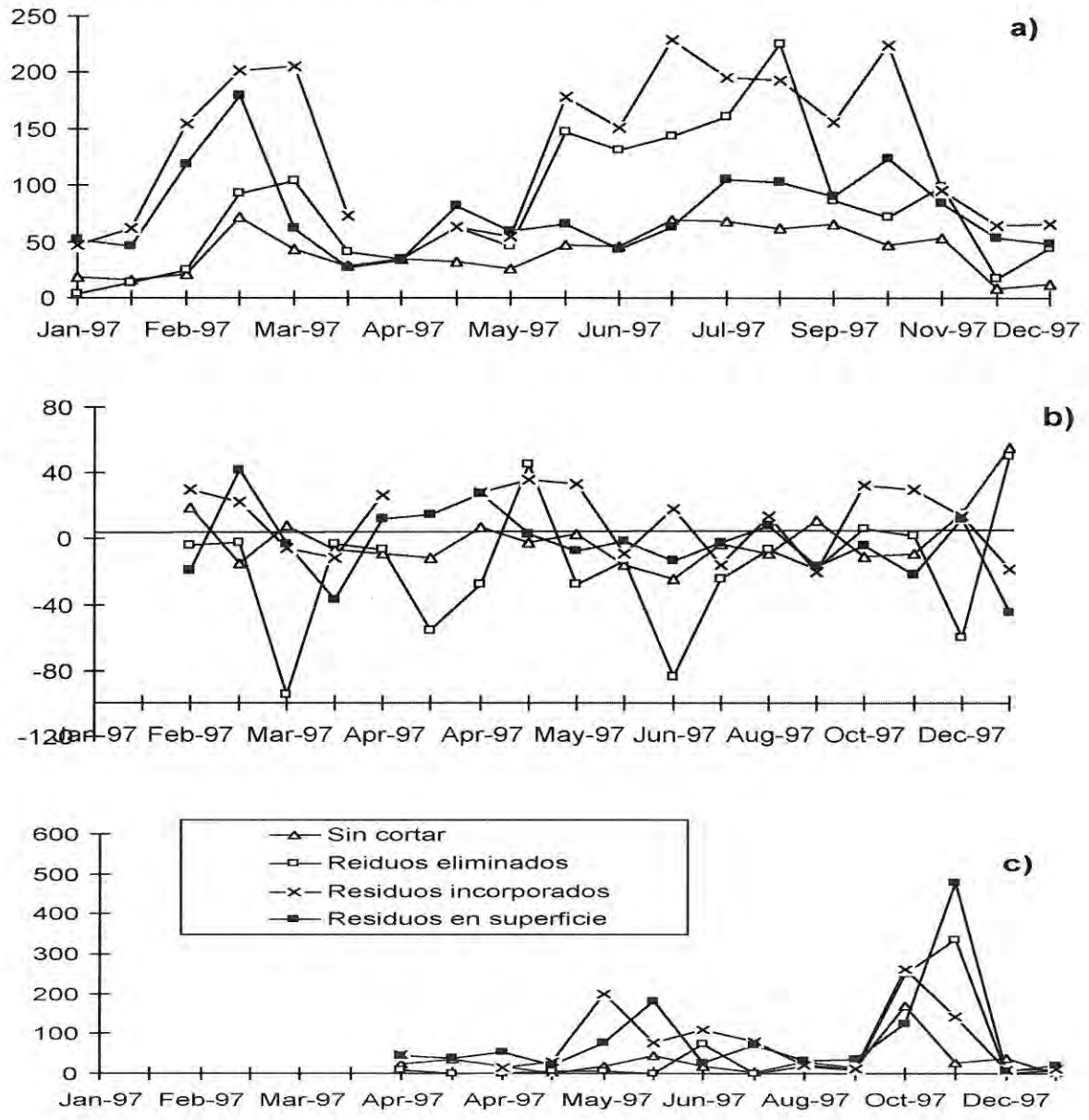


Al en el CIC de suelos forestales de Galicia

INFLUENCIA DE LA TALA FORESTAL Y DEL MANEJO DE RESTOS DE CORTA SOBRE LOS FLUJOS DE GASES DE TIPO INVERNADERO EN UN SUELO FORESTAL

Pérez-Batallón, P.; Ouro, G.; Macías, F.; Merino, A.
Departamento de Edafología y Química Agrícola. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Santiago de Compostela. 27002 Lugo (e-mail: amerino@lugo.usc.es)

El estudio se realizó en una plantación de Pinus radiata localizada en la provincia de Lugo. En el área talada se practicaron tres técnicas habituales de preparación del terreno para la siguiente rotación: a) retirada de los residuos de tala y horizonte orgánico, b) incorporación de los residuos de tala al horizonte mineral superficial y c) distribución de los restos sobre la superficie del terreno. Las labores de preparación intensa del terreno afectaron sensiblemente a las condiciones ambientales del suelo y alteraron notablemente la dinámica del C con respecto al suelo bajo pinar sin talar. Como consecuencia de la mayor humedad del suelo y temperatura, los suelos de parcelas taladas, pero especialmente las que mantuvieron los restos de corta, registraron aumentos considerables la emisión de CO_2. La mayor mineralización implica una emisión considerable de C a la atmósfera, por lo que las prácticas en las que se retiran los restos de corta pueden reducir el contenido de materia orgánica en el suelo y contribuir, así, a incrementar la concentración de CO_2 atmosférico.El suelo bajo pinar sin talar actuó fundamentalmente como sumidero de CH_4. La dinámica de este gas se alteró considerablemente después de la tala y preparación del terreno, si bien la respuesta fue diferente en los tres tratamientos practicados. La extracción de restos de corta potenció la capacidad de oxidación de CH_4 por el suelo, mientras que su incorporación tuvo como consecuencia aumentos de las emisiones de CH_4. Las emisiones de N_2O fueron siempre muy bajas, no apreciándose diferencias después de la tala ni con ninguna de las técnicas de preparación del terreno ensayadas.



LOS SUELOS COMO SUMIDERO DE CARBONO: MATERIA ORGÁNICA DE LOS SUELOS DE GALICIA

F. Macía; R. Calvo; F. Arce; C. Bulnes; R. López

CONTENIDO

De un total de 3000 muestras de horizontes superficiales de suelos de Galicia el contenido de C oscila entre 1 y 55%.Los valores más frecuentes en suelos no cultivados se encuentran en el intervalo 6-8%. Los factores de mayor influencia en la variabilidad del contenido de C son: clima, altitud y, sobre todo, uso y tipo de suelo o proceso edáfico dominante lo que, a su vez, está relacionado con la naturaleza de los componentes activos del suelo. La transformación de suelos con vegetación forestal arbolada o no en praderas y cultivos supone unas perdidas medias de 20-30% y 30-50% respectivamente. Los suelos hidromorfos y, especialmente los Histosoles son los que contienen un mayor porcentaje de C (30-55%). De los suelos bien drenados con vegetación forestal la acumulación de C sigue la secuencia: *Andosoles> Suelos ándicos> S. alumínicos> S. podsólicos> S. kándicos y ferrálicos > S. hipermagnésicos*, que está fundamentalmente relacionada con la naturaleza y abundancia de formas activas de Al.

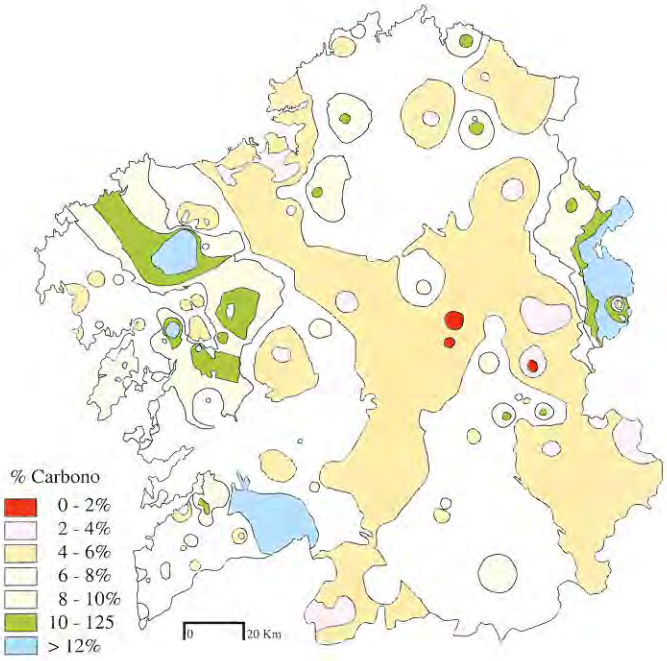


Fig. 1.- Mapa simplificado de la distribución del C en suelos bien drenados de Galicia

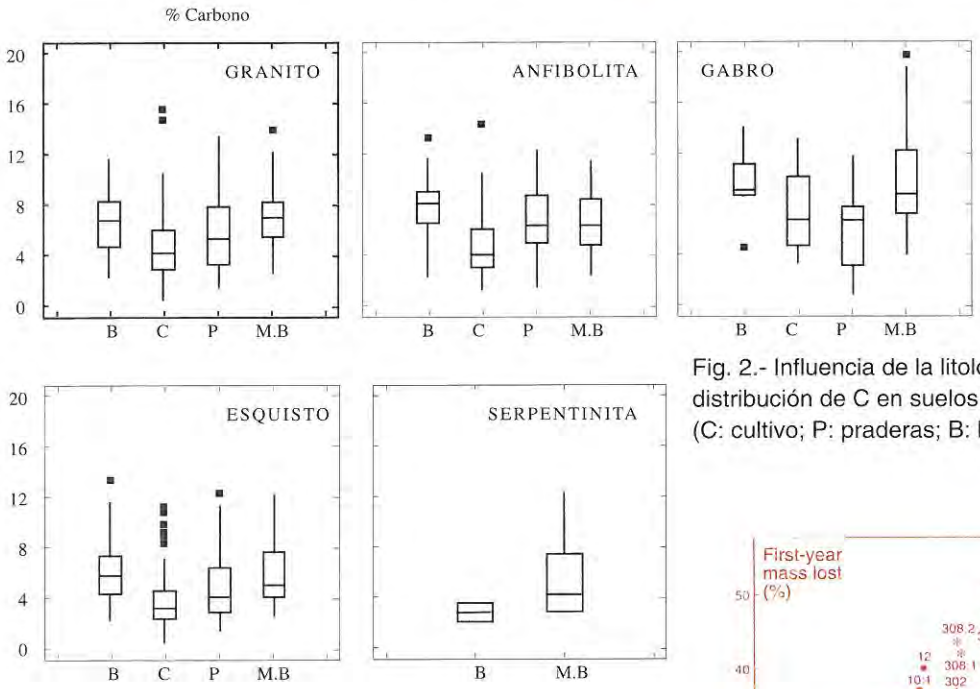
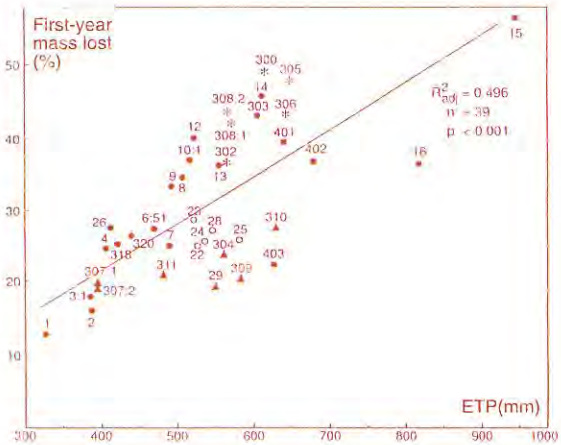


Fig. 2.- Influencia de la litología y uso del suelo en la distribución de C en suelos bien drenados de La Coruña (C: cultivo; P: praderas; B: bosques; MB: monte bajo)



Relación entre la pérdida de biomasa por descomposición de hojarasca de *P. sylvestris* en diferentes regiones climáticas (Norte de escandinavia(1), Galicia (305 y 306), Sur de españa (29), Sur de Italia (311), Florida (15) (Berg, B. et al 1993)

	S. Forestales	S. cultivados	Praderas	% Pérdida de C	
				Cultivos	Praderas
Esquistos	5.6	3.2	4.0	43	29
Granitos	7.0	4.3	5.4	39	23
Anfibolitas	7.9	4.0	6.3	49	20
Gabros	9.1	6.7	6.6	26	27
Pizarras	7.8	4.3	5.4	45	31
Serpentinitas	4.2	-	-	-	-

Tabla 1.- Valores más frecuentes en suelos bien drenados de La Coruña sobre diferentes litologías y porcentajes de pérdida de C en la transformación en cultivos y praderas.

PROPIEDADES DE LA MATERIA ORGANICA

* Predominan los ácidos húmicos sobre los fúlvicos. Las tasas de extracción de ácidos fúlvicos en g/Kg de suelo son del orden de 100 veces inferior a la de ácidos húmicos.

* El peso molecular y la composición elemental de los ácidos húmicos y fúlvicos es muy próxima si bien estos últimos presentan mayor contenido de Oxígeno.

* Los ácidos fúlvicos presentan dos constantes de acidez con valores de: pKa_1: 3.1 a 4.2 y pKa_2: 6.0-8.1.

* El contenido de grupos ácidos oscila entre 4.0 y 6.5 moles/kg con escasas variaciones según el tipo de suelo.

* El porcentaje de aromaticidad varía entre 15 y 42% siendo más elevado en los suelos de mayor acidez y carácter turboso.

* Predominan las formas de materia orgánica de elevada estabilidad en formas complejadas con Al y Fe, oxidable y, en algunos suelos, con altos porcentajes de materia orgánica no oxidable.

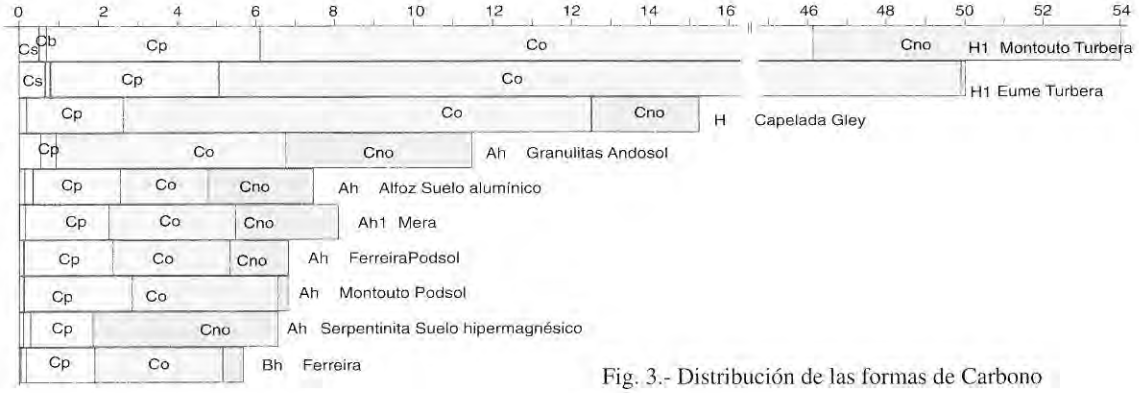


Fig. 3.- Distribución de las formas de Carbono

Tabla 2.- Relaciones molares de los complejos organoalumínicos y organoférricos

Perfil		Hor.	Cp/Alp	Cp/Fep	Alp/Fep	Al/Fe lábiles	Al/Fe estables	Al/Fe muy estables
Alfoz	Suelo alumínico	Ah	6.1	21.4	3.5	51.8	>>>	2.5
Ferreira	Podsol	Ah	28.8	71.6	2.5	9.1	12.4	0.4
		Bh	5.0	7.5	1.5	>>>	>>>	1.6
Montouto	Podsol	Ah	105.8	188	1.8	21.7	>>>	0.4
		Bs	22.1	6.5	0.3			
	Turbera	H1	76.3	1424	18.6	29.5	109.7	9.7
		H3	77.7	887	11.4	7.4	9.0	23.8
Eume	Turbera	H1	43.3	778	17.9	11.2	16.9	53.8
Mera	S.ándico	Ah1	5.0	14.9	3.0	466	3974	2.0
		Ah2	7.0	16.2	2.3	683	>>>	0.8
Capelada	Andosol	Ah	9.8	34.0	3.5	95.2	>>>	2.0
Capelada	Gley	H	11.9	17.1	1.4	81.8	5.5	0.7
		Ag	28.5	296	10.4	69.3	>>>	41.4
Capelada	S.hiper-magnésico	Ah	13.5	12.7	0.9	400	142	0.5

* La materia orgánica alcanza largos períodos de permanencia incluso en suelos bien drenados, lo que confirma su estabilidad

1.- Ah de Andosol sobre anfibolitas (Boqueixón): **1070 +-50** (muestra GrN 21439)
2.- Materia orgánica en zona de línea de piedras (Horizonte Ah2) en Andosol sobre gabros superficial en perfil de gabros (Pena Cabaleira).: **2600+-60** (GrN 21444)
3.- Horizonte 3Ah (Ranker atlántico del Pedroso). . **4900+-100** (GrN 21445)
4.- Bh del Podsol del Pico Sacro: . **1090+-70** (GrN 21446)

* Hay una baja movilidad de los compuestos húmicos. Solamente existen algunas fracciones móviles en suelos podsólicos y turbosos.

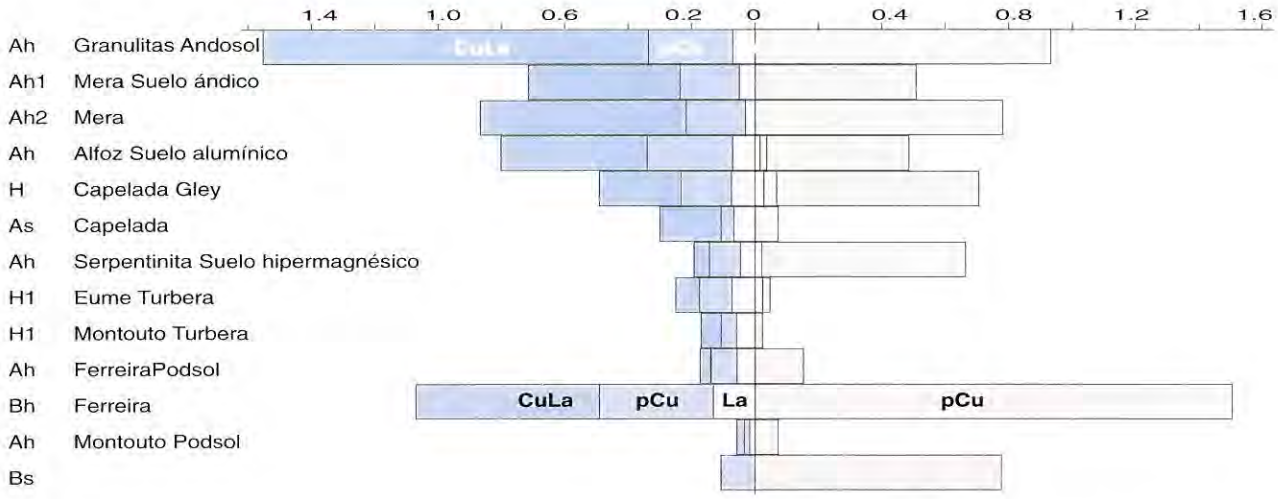


Fig. 4.- Distribución de los complejos organoalumínicos y organoférricos según su estabilidad (g/10g de suelo)

Tabla 3.- Estimación de la movilidad y biodisponibilidad de la materia orgánica. Formas solubles en K_2SO_4 0.5 M y relaciones molares Cp/Alp+Fep. Carbono en la biomasa

		Hor.	%C sol.	% Cs/Ct	Cp/Alp+Fep	%Cb	% Cb/Ct
Alfoz	S. alumínico	Ah	0.2	0.01	4.7	0.23	3.1
Ferreira	Podsol	Ah	0.03	0.4	19.2	0.04	0.6
		Bh	0.01	0.01	2.9	0.07	1.2
Montouto	Podsol	Ah	0.03	0.4	78	0.04	0.6
		Bs			5.0		
	Turbera	H1	0.45	0.8	68.6	0.18	0.3
		H3	0.40	0.7	72.0	0.04	-
Eume	Turbera	H1	0.61	1.2	39.7	0.07	0.1
Mera	S.ándico	Ah1	0.03	0.4	4.7	0.07	0.9
		Ah2	0.17	2.9	1.8	0.22	3.8
Capelada	Andosol	Ah	0.48	4.2	7.5	0.39	3.4
Capelada	Gley	H	0.03	0.2	7.0	0.14	0.8
Capelada	S.hipermagnésico	Ah	0.07	1.1		0.13	2.0

* El porcentaje de materia orgánica en la biomasa del suelo oscila alcanza como máximo un 3-4% del contenido de carbono total siendo mínimo en suelos turbosos podsólicos, hipermagnésicos y, en general, en los suelos de baja fertilidad no abonados donde los valores del contenido de C suelen ser inferiores a 0.1%.

LOS SUELOS COMO SUMIDEROS DE CARBONO

* El contenido total de Carbono de los suelos de Galicia oscila entre valores de 20-50 t/ha en suelos de cultivo a valores en torno a 2000 t/ha en algunos Histosoles. En Canadá los valores oscilan entre 130 tC/ha en Inceptisoles a 1350 tC/ha en Histosoles (Tarnocai, 1997).

Tabla 4.- Contenido de Carbono en suelos de Galicia

Tipo de Suelo	t/ha	t/ha/cm suelo
Histosoles	900-2000	5.0-7.0
Suelos alumínicos de fase cumúlica	700-950	5.0-7.7.
Andosoles de fase cumúlica	350-550	5.0-7.8
Suelos ándicos	150-250	4.5-5.2
Suelos alumínicos de fase somera	100-250	4.0-6.0
Suelos lépticos	50-100	4.0-6.0
Suelos cultivados	20-50	2.0-3.0

* El sumidero edáfico de C se determina teniendo en cuenta el contenido de C y la superficie ocupada por cada tipo y uso de suelo. Se estima un valor de 2.8-6.2.108 tC con una media 149 tC/ha. El conjunto de suelos no cultivados (80%) representaría en torno al 95% del sumidero actual de Carbono. Dentro de los suelos forestales el mayor reservorio lo constituyen los suelos alumínicos.

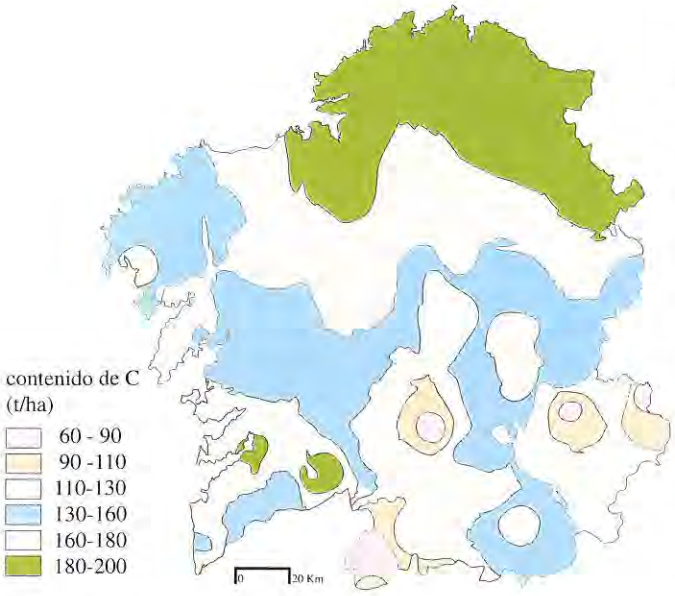


Fig. 5.- Distribución del Contenido de C en los suelos bajo vegetación de pinar

* Cambios de uso del suelo (paso de cultivos marginales a sistemas forestales) y, sobre todo, medidas de conservación que incrementen el espesor de los suelos pueden aumentar el sumidero de Carbono de los suelos de Galicia de manera sustancial en un plazo relativamente corto. Por otra parte, dada la abundancia de Al y Fe reactivos es posible retener mayor cantidad de C en los suelos, especialmente en los suelos ándicos (3%)y alumínicos (>90%). La tasa de mineralización potencial de la materia orgánica en los suelos de Galicia es inferior a la existente en otros suelos de sistemas templados.

* La velocidad de acumulación neta de Carbono en suelos es elevada obteniéndose valores del orden de 0.5 tC/ha/año en suelos ándicos y alumínicos de fase cumúlica para los últimos 500 a 1000 años y de 0.8 tC/ha/año en Histosoles para los últimos 4000 años. La Central Térmica de As Pontes emite unos 2.45 millones de

* La emisión de CO2 en suelos forestales varía entre 3 y 8 tC/ha/año subiendo a 10 tC/ha/año cuando se tala y elimina la cobertura vegetal. Considerando valores medios los bosques emiten anualmente entre 1 y 4% de su contenido total de C.

* En general los suelos forestales fijan CH4 y sólo lo emiten en cantidades pequeñas en el primer año tras la tala cuando se dejan los restos en los suelos.

LA BIOMASA COMO SUMIDERO

* El eucaliptal es el principal sumidero de Carbono en biomasa. a partir de la distribución de biomasa en madera, corteza, ramas, hojas y raices y teniendo en cuenta los porcentajes de Cy densidad de cada fracción así como las produccciones medias y óptimas para cada zona de Galicia se obtienen los valores de la capacidad de fijación de esta especie. El pinar es muy inferior en su capacidad como sumidero de Carbono en la zona norte de Galicia mientras que se iguala en el sur y es el más competitivo en aquellas áreas en las que, por razones climáticas, no puede entrar el eucaliptal.

	Norte		Centro		Sur	
	m3/ha/a	tC/ha/a	m3/ha/a	tC/ha/a	m3/ha/a	tC/ha/a
Eucaliptal medio						
biomasa áerea	25.0		22.3			
madera cosechada	19	4.9	17	4.4	16	4.2
corteza	2.4	0.38	2.2	0.35	2.0	0.31
ramas y hojas	3.6	0.54	3.1	0.47	3.0	0.46
raiz	8.3	2.14	7.4	1.91	7.0	1.84
Total		7.96		7.13		6.81
Eucaliptal óptimo		13.53				
Pinar (*P.pinaster*)						
madera		2.3				3.0
ramas		0.7				0.8
acículas		0.9				1.2
corteza		0.1				0.2
raiz		0.76				1.0
Total		4.76				6.2

* Las necesidades de eucaliptales y pinares para fijar la emisión de C de la Central Térmica de As Pontes (9 millones de T/a de CO2) serían:

eucaliptal medio 15 años (sólo en biomasa propia): 307. 789 ha
eucaliptal óptimo 19 años (sólo biomasa propia): : 181.079 ha
eucaliptal medio + sumidero suelo (0.5tC/ha/a): 289.528 ha
eucaliptal óptimo + sumidero suelo: 174.626 ha
pinar + sumidero suelo: 465.779 ha

Estas cifras pueden reducirse si se tiene en cuenta la capacidad de fijación en la biomasa arbustiva y se incentiva la fijación de C mediante técnicas silvícolas, incremento de las condiciones de biostaxia, etc.

* La fijación en cultivos de biomasa se ha ensayado en dos campos de experimentación (Rianxo y Santiago) con Miscanthus sinensis, variedad giganteus,. Los rendimientos medios han sido de 36 t/ha/a con una fijación de 17 tC/ha/a en la biomasa aérea (no se han realizado medidas de biomasa radicular). Con esta capacidad de fijación 140.000 ha bastarían para fijar el C desprendido en As Pontes, o menos, si se tiene en cuenta la biomasa radicular.

FITORREMEDIACIÓN: UNA TÉCNICA NOVEDOSA PARA LA DESCONTAMINACIÓN DE SUELOS

Kidd, P., Díez, J. y Monterroso, C.

EL PROBLEMA

La acumulación de metales pesados en suelos, aguas superficiales y subterráneas representan un enorme problema ambiental y de salud humana. La contaminación por metales pesados se debe, en general, a procesos industriales relacionados con la actividad minera, metalúrgica, plantas de incineración, utilización de combustibles fósiles, lodos de depuradoras urbanas, pesticidas, fertilizantes inorgánicos y lodos repetidamente aplicados en los suelos agrícolas (Ross 1994). La limpieza los lugares actualmente contaminados, utilizando métodos clásicos de descontaminación, supondría la inversión de enormes presupuestos. Se necesita, por tanto, urgentemente una solución tecnológica efectiva y viable.

UNA SOLUCIÓN

La fitorremediación, una técnica novedosa basada en la eliminación o inmovilización de los contaminantes a través de la vegetación (Cunningham y Lee 1995), está despertando actualmente mucho interés debido a su bajo coste, relativa efectividad y su bajo impacto ambiental. Esta técnica utiliza plantas conocidas como **"hiperacumuladoras de metales"** que muestran una gran tolerancia a los metales y contienen en sus hojas >100 mg Cd kg^{-1}, 1000 mg Ni/Cu kg^{-1} o >10000 mg Zn/Mn kg^{-1} (Brown et al. 1995). Dentro de fitorremediación hay dos áreas aplicables a la limpieza de metales:

La Fitoextracción, el uso de plantas hiperacumuladoras para la eliminación de los metales del suelo y su concentración en la planta. Las sucesivas siegas de la biomasa aérea, con altas concentraciones de metales, pueden ser convenientemente tratadas como fuente de metales o como combustible en plantas incineradoras, minimizando los residuos metálicos (en cenizas) y abaratando el proceso de descontaminación.

La Fitostabilización, el uso de plantas tolerantes para reducir la movilidad de los metales tóxicos, evitando su lixiviado hacia las aguas naturales.

DESVENTAJAS DE LA FITORREMEDIACIÓN

Muchas de las plantas hiperacumuladoras no son cultivadas normalmente y **producen muy poca biomasa.** Algunos ejemplos son *Thlaspi caerulescens* y *Alyssum pintodasilvae*. El tiempo necesario para realizar la descontaminación de un suelo usando estas plantas silvestres haría inviable esta técnica.

LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Actualmente, en el Dpto. de Edafología y Química Agrícola de la Universidad de Santiago estamos desarrollando distintos aspectos para mejorar la viabilidad de la fitorremediación como método de limpieza de suelos. Algunos de ellos se recogen en un proyecto financiado por la Xunta de Galicia***: Aplicabilidad de fitorremediación en Galicia: una técnica novedosa para la descontaminación de suelos y evitar la contaminación de aguas subterráneas*** (PGIDT99MA20003), que se ha desarrollado en dos fases:

Fase 1: Nuestro objetivo inicial fue el de seleccionar especies vegetales adecuadas, bien hiperacumuladoras o sólo cumuladoras de metales, para su uso como fitoextractores. Se realizó una búsqueda preliminar a través del análisis del contenido de metales en tejidos vegetales (raiz, tallos y hojas) de numerosas especies desarrolladas en las áreas serpentiníticas más cercanas (Melide, Galicia y Trasós-Montes, Portugal NE). Las concentraciones de metales en las plantas de zonas ultrabásicas (UB) se compararon con las de zonas de rocas básicas (B) y ácidas (migmatitas, M y esquistos, S). Como resultado hemos identificado una nueva especie, *Cistus ladanifer subsp. ladanifer* que, además de acumular metales pesados, presenta una biomasa sensiblemente mayor que las especies silvestres normalmente utilizadas como fitoextractoras. De acuerdo con la composición del suelo, las plantas de las zonas serpentiníticas (UB) tienen concentraciones de Ni y Cr significativamente más elevadas que en el resto de los lugares. En contraste, las poblaciones desarrolladas en áreas de rocas ácidas (S) muestran mayor concentración de Zn (Figura 1).

Fase 2: Para determinar el efecto del exceso de metales sobre el crecimiento vegetal y el alcance de la acumulación y translocación de los metales hacias las hojas de las plantas, se realizaron cultivos hidropónicos en condiciones similares a las encontradas en suelos contaminados. Se recogieron semillas de las cuatro poblaciones de *C. ladanifer* de las áreas seleccionadas (UB, B, M y S) y las plántulas germinadas se cultivaron en disoluciones de concentraciones crecientes de metales pesados. En concordancia con el origen de las plantas encontramos distintos niveles de tolerancia a los metales (Fig. 2). La comparación entre la concentración elemental de

la raiz y las hojas indican que *C. ladanifer* es una especie muy activa en la translocación de elementos hacia la biomasa aérea (Figuras 1 y 3). Obtuvimos concentraciones de Zn en las hojas de Cistus de hasta 7000 mg/kg, una concentración comparable con la encontrada en especies hiperacumuladoras de Zn.

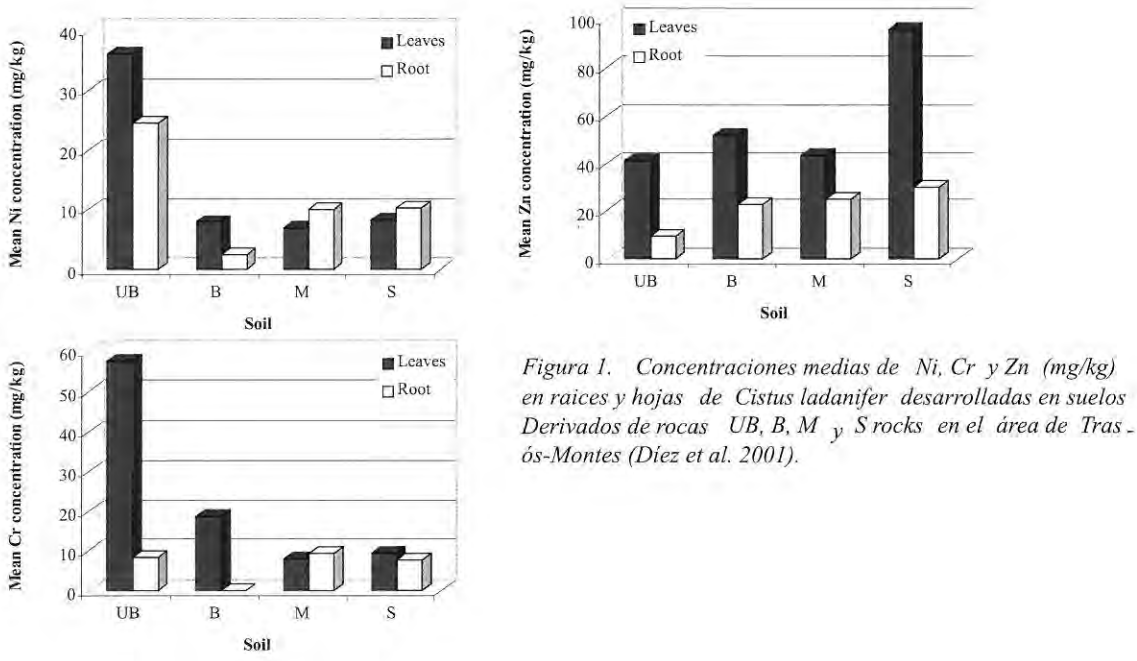


Figura 1. Concentraciones medias de Ni, Cr y Zn (mg/kg) en raices y hojas de Cistus ladanifer desarrolladas en suelos Derivados de rocas UB, B, M y S rocks en el área de Tras-ós-Montes (Díez et al. 2001).

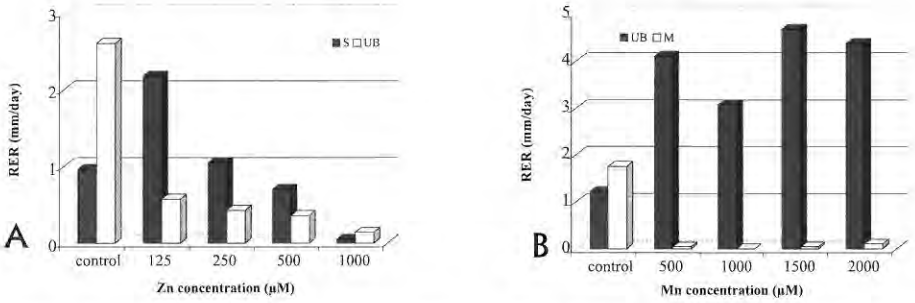


Figura 2. Tasa de elongaci ón de la raiz (RER) de Cistus ladanifer cultivadas en disoluciones con Zn (A) y Mn (B). Los ecotipes son de áreas con rocas ultrabasicas (UB), migmatitas (M) and schists (S; Kidd et al. 2001).

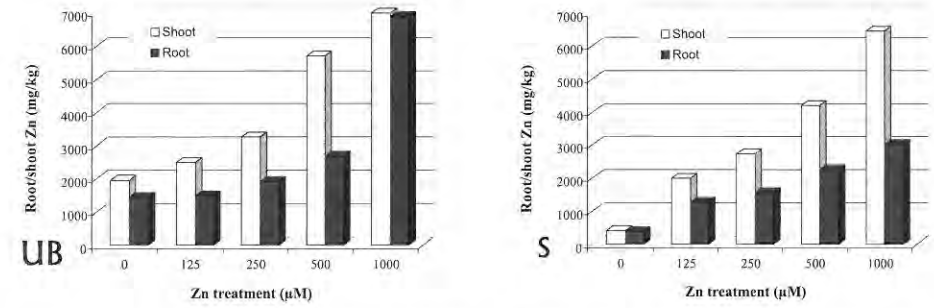


Figura 3. Concentración de Zn en raiz y hojas de Cistus ladanifer originarias de zonas de rocas ultrabásicas (UB) y esquistos

Referencias

Brown, S.L., Chaney, R.L., Angle, J.S. y Baker, A.J.M. 1995. Soil Science Society America Journal, 59, 125-133.

Cunningham, S.D. y Lee, C.R. 1995. Bioremediation:science and applications, pp. 145-156. SSSA, Madison, USA.

Díez, J., Kidd, P. y Monterroso, C. 2001. Proceedings of Biogeochemistry of Trace Elements, Guelph, Canada.

Kidd, P., Díez, J. & Monterroso, C. 2001. Proceedings of Biogeochemistry of Trace Elements, Guelph, Canada.

Ross, S.M. 1994. Toxic metals in soil-plant systems. J. Wiley Sons, UK.

CONTAMINACION DE SUELOS Y AGUAS POR NITRATOS

F. Mac□as

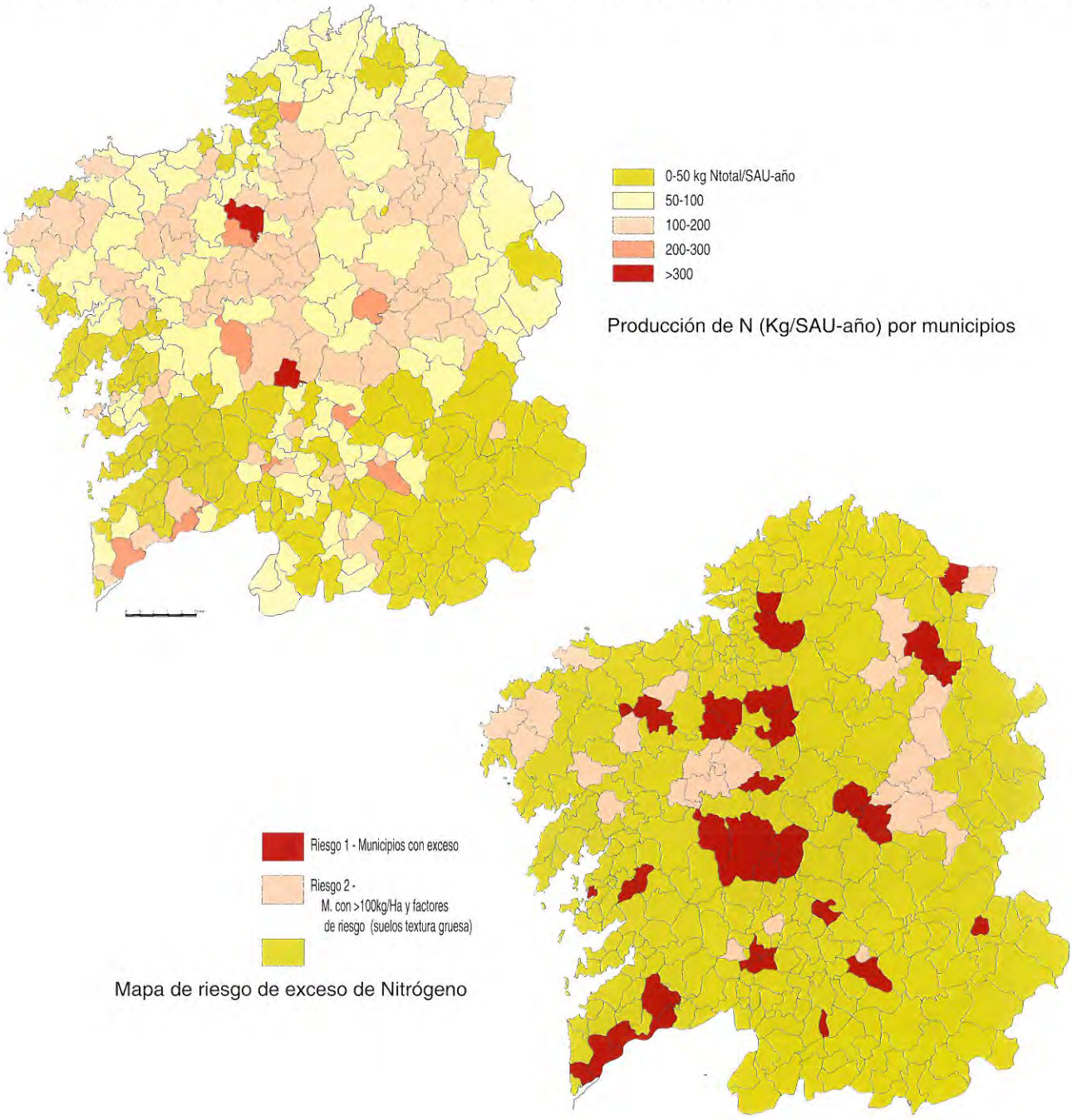
Galicia es una de las comunidades espa□olas con mayor carga ganadera susceptible de producir procesos de contaminaci□n de suelos y aguas por compuestos nitrogenados. As□ se recoge enel estudio en preparaci□n de la Agencia de Medio Ambiente Europea "Dow to earth: Soil Degradation and sustainable development in Europe (2001) en el que se identifican los denominados "puntos calientes" de contaminaci□n de suelos en Europa apareciendo la Comunidad gallega junto con la c□ntabra y la catalana como las □nicas qu superan el umbral de aporte de 100 kg/ha/a de N. Adem□s, en el mismo estudio seindica que gran parte del territorio espa□ol supera e umbral de carga cr□tica de nitr□geno eutrofizante.

Se ha estudiado la producci□n de N por actividades ganaderas y su posible utilizaci□n como fertilizante para atender a la demanda d los cultivos existentes en la misma zona. A partir de estos datos pueden calcularse las situaciones de riesgo previsibles:

Riesgo 1.- Muncipios con exceso de producci□n sobre la demanda de N por los cultivos.

Riesgo 2.- Municipios sin exceso de producci□n sobre la demanda pero que presentan producciones elevadas (> 100 kg/ha/a) y suelos con drenaje elevado.

En ambos casos se ha considerado la red fluvial y los acu□feros para establecer una red de seguimiento preventivo



Producción de N (Kg/SAU-año) por municipios

Mapa de riesgo de exceso de Nitrógeno

SUELOS CONTAMINADOS CON ISÓMEROS DE HCH EN EL POLÍGONO DE TORNEIROS (PORRIÑO, PONTEVEDRA)

C. Monterroso C.; M. Camps y F. Macías

EL PROBLEMA

En diferentes momentos se abandonaron en el entorno de Porriño residuos de la **fabricación de lindano** (isómeros del hexaclorociclohexano, HCH) sin que se conozca con precisión su composición, cantidad, distribución espacial o el grado de transformación. El inicio de estos vertidos se sitúa entre 1948 y 1954 y se prolongaron hasta 1964. Posteriormente hubo un esparcim iento de los residuos como consecuencia del allanamiento mecánico del lugar

La zona afectada, con contenidos de HCH totales en suelos superiores a 2 mg kg^{-1} (valor de intervención según la normativa actual de la Xunta de Galicia) tiene una superficie de 4.3 ha, la contaminación alcanza los 6.5 m de profundidad, por lo que se estima un volumen total de suelos afectados de 135.000 m^3

ACTUACIONES URGENTES

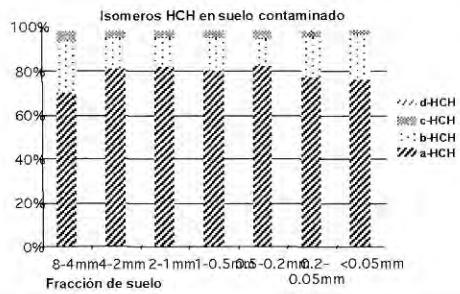
La Xunta de Galicia ejecutó, como medida de urgencia, un proyecto de encapsulamiento de la zona demayor contaminación y promueve, a través de distintas universidades gallegas, un proyecto de investigación coordinado. Los objetivos de este proyecto son el de evaluar el comportamiento del contaminante en el medio y el de desarrollar de tecnologías biológicas de limpieza (bio y fitorremediación) aplicables a las áreas de menor contaminación.

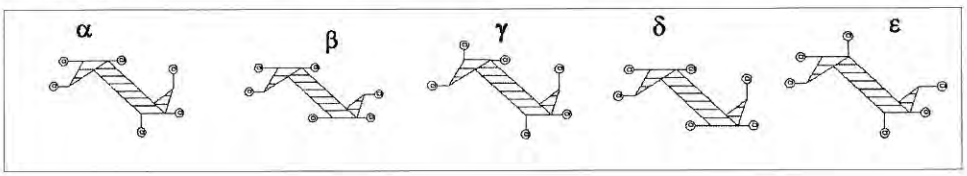
LOS SISTEMAS CONTAMINADOS

LOS SUELOS afectados derivan de sedimentos aluvio-coluviales de textura heterogénea con abundancia de fragmentos gruesos. Se identifican varios niveles de terrazas del río Louro y materiales que parecen proceder de formaciones torrenciales más antiguas, cuyos materiales han sido retrabajados y depositados en las terrazas fluviales. La permeabilidad, aunque muy variable en función de la presencia o ausencia de lentejones limoarcillosos de estructura masiva, ha permitido el paso del contaminante al acuífero.

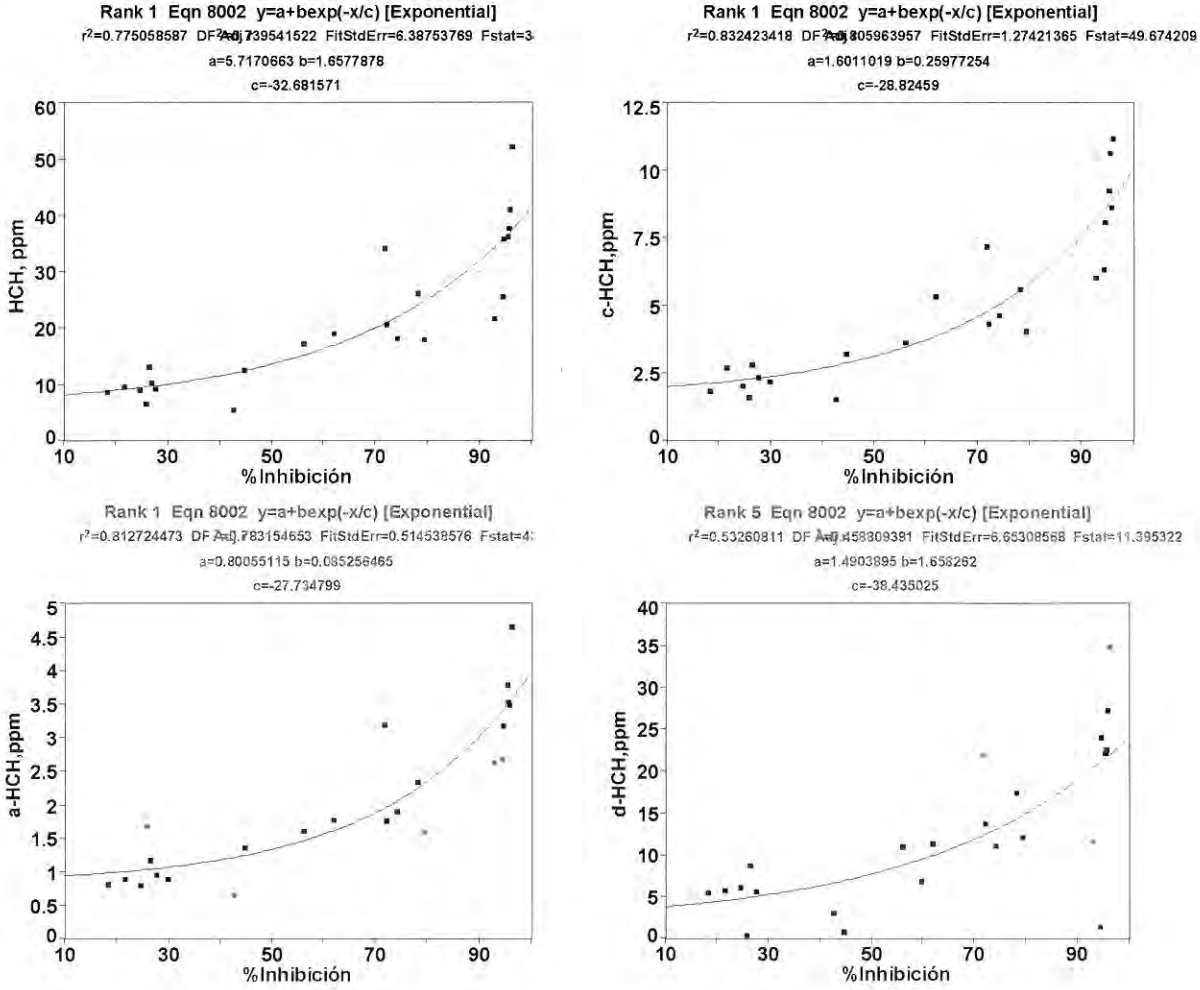
EL CONTAMINANTE consta de 4 isómeros del hexaclorociclohexano (HCH), siendo el isómero α-HCH el mayoritario, seguido del β-HCH. Aparece distribuido heterogéneamente en toda el área afectada y en las distintas fracciones granulométricas del suelo.

LIXIVIABILIDAD DE LOS ISÓMEROS. El isómero δ- es el más soluble en agua, seguido del γ-HCH (lindano). Son muy insolubles los isómeros α- y β-. Cantidad y tipo de materia orgánica, granulometría y pH son factores del suelo que intervienen en su lixiviación.





ECOTOXICIDAD DE LOS ISÓMEROS. En algunas pruebas de efectos tóxicos de los lixiviados con la *bacteria Thiobacillus fosforeum* hemos visto una relación directa entre la concentración total de HCH y la inhibición del crecimiento de la bacteria, siendo el isómero α- el que ejerce el efecto más depresivo.



TRABAJOS EN CURSO

Los trabajos iniciados en el Dpto. de Edafología y Q. Agrícola, USC, están encmarcados el proyecto "Evaluación y Biorremediación de suelos contaminados con isómeros de HCH en el Polígono de Torneiros, Porriño (Pontevedra), 2000-2002", financiado por la Xunta de Galicia. Algunos de estos estudios son:

1. Caracterización de los isómeros de HCH y sus principales subproductos en los suelos contaminados y aguas de drenaje
2. Procesos de sorción/desorción y difusión de los isómeros de HCH y sus principales subproductos en el suelo
3. Procesos de transformación biótica y abiótica del contaminante en el medio edáfico
4. Efectos de distintas especies vegetales sobre la degradación del contaminante

ADSORCIÓN DE FLÚOR EN SUELOS DE GALICIA DESARROLLADOS SOBRE DIFERENTES MATEIRALES DE PARTIDA. EFECTOS DEL APORTE DE FLÚOR EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO

A. Romar, C. Gago, M.L. Fernández Marcos, E. Alvarez
Dpto. de Edafología y Q. Agrícola. Escuela Politécnica Superior, 27002 Lugo

OBJETIVOS

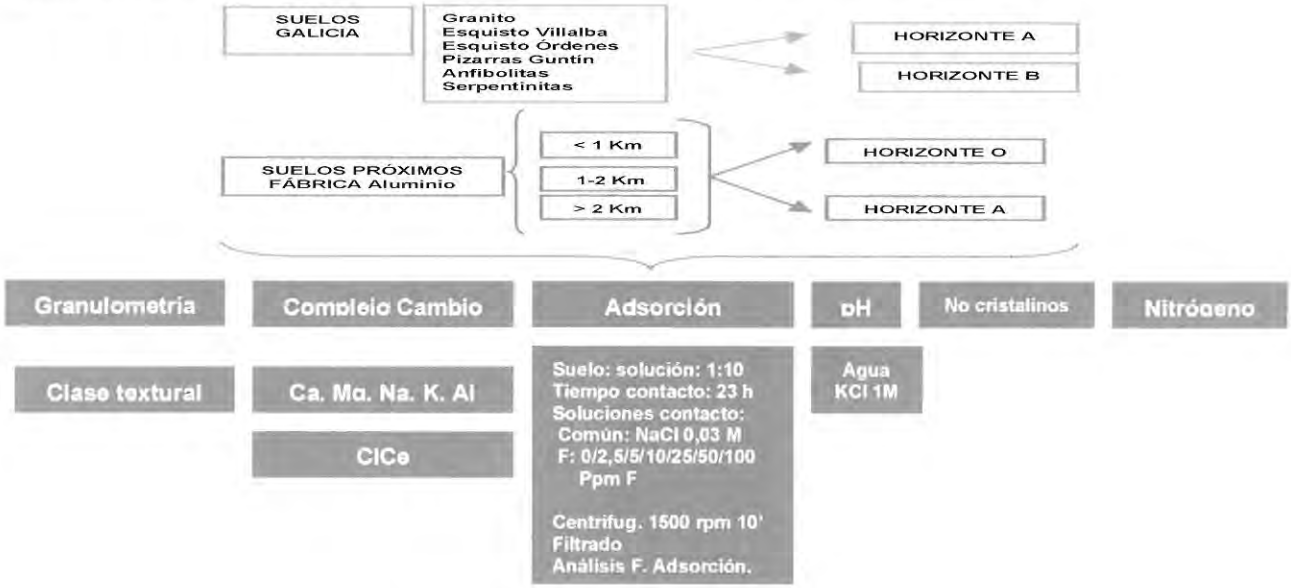
* Estudiar la capacidad de adsorción de diferentes tipos de suelos gallegos y evaluar su posible papel como protectores de otros sistemas (aguas, vegetación...).

* Evaluar la capacidad de adsorción y desorción de flúor en suelos sometidos a inmisión de flúor procedente de una fábrica de aluminio en San Ciprián (Lugo).

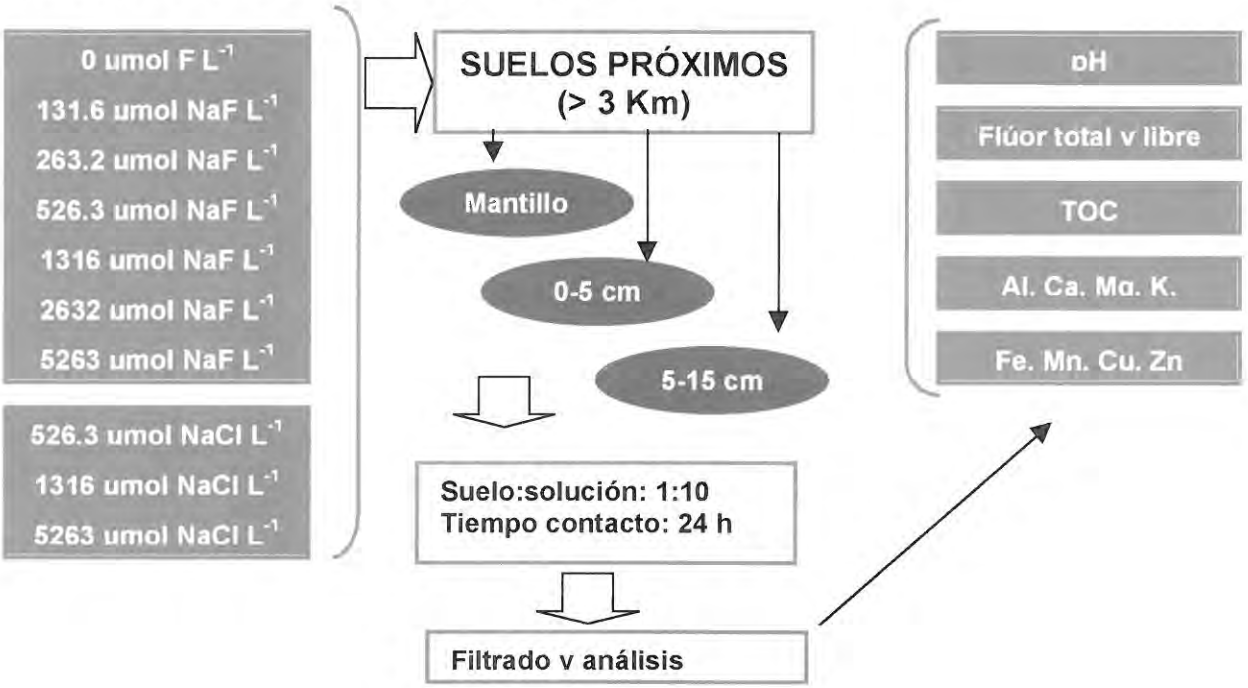
* Estudiar el efecto de la adición de flúor en las propiedades de los suelos forestales y de cultivo de las inmediaciones del complejo de aluminio de San Ciprián, especialmente en los valores de pH, especies y toxicidad del aluminio, contenidos de materia orgánica soluble, Ca, Mg, K, y algunos micronutrientes: Fe, Mn, Cu y Zn.

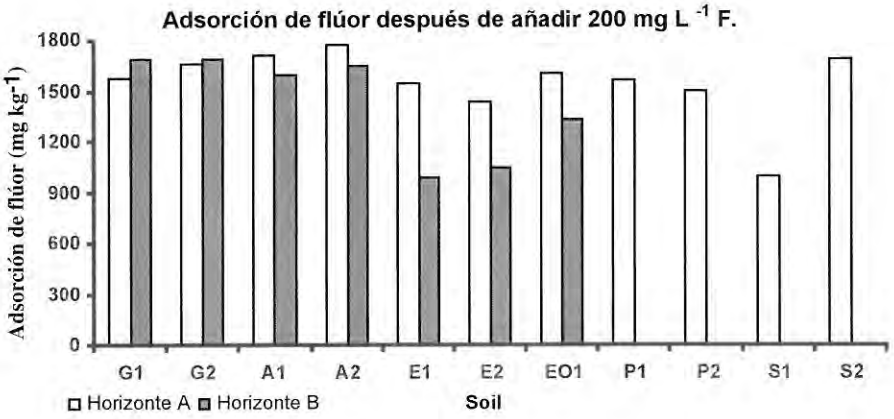
MATERIAL Y MÉTODOS

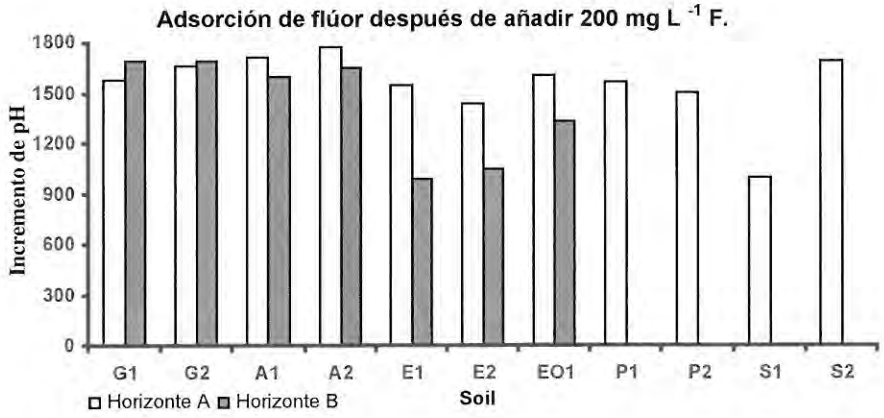
Adsorción de flúor

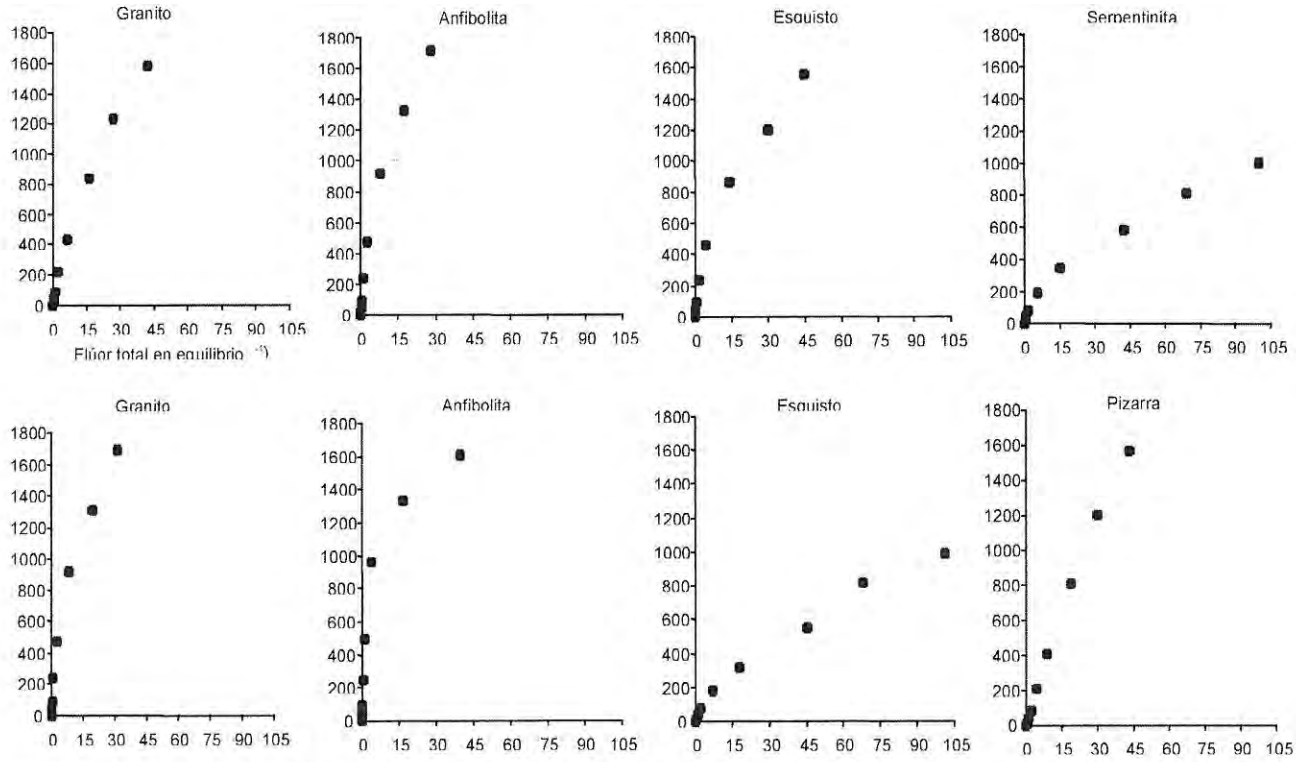


Efectos de la adición del flúor en las propiedades químicas del suelo

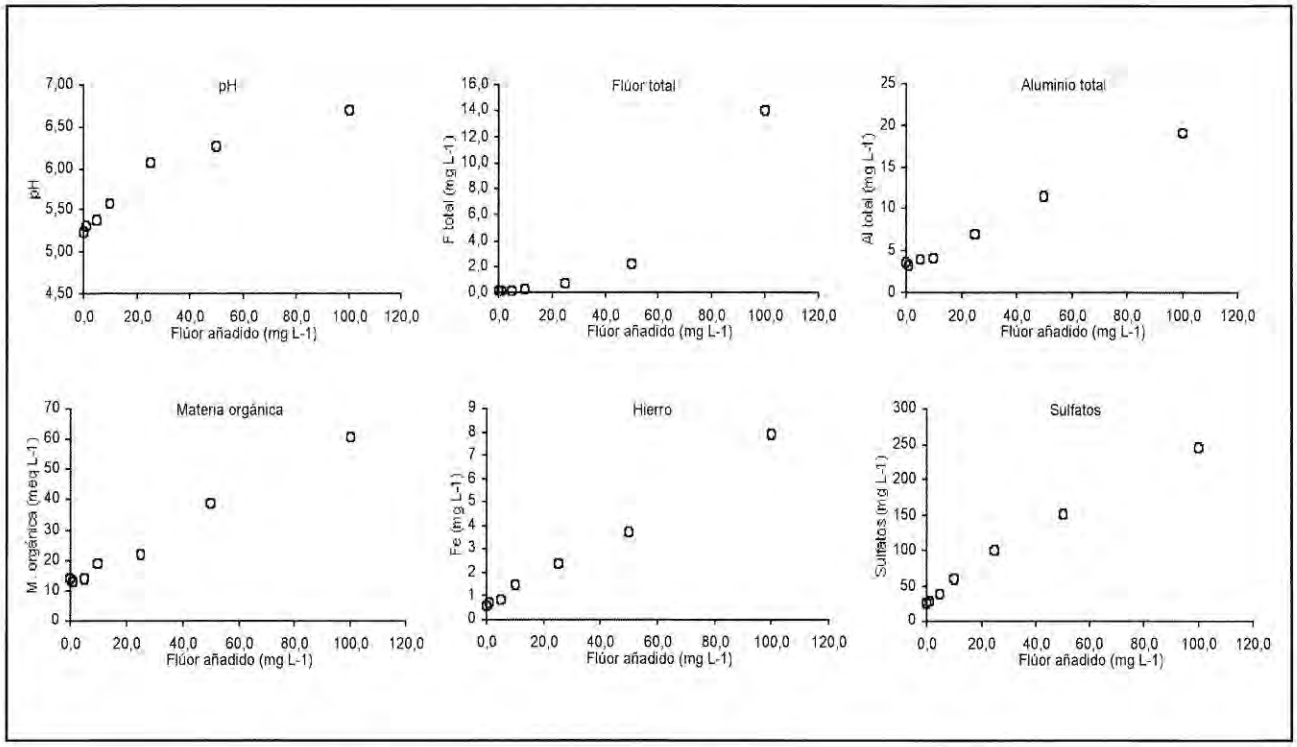








Adsorción de flúor en diferentes materiales de partida (granito, anfibolita, esquisto, serpentinita y pizarra) y distintos horizontes.



Efectos de la adición de flúor en diferentes parámetros químicos del suelo.

CONCLUSIONES

* La adsorción de flúor en diferentes materiales de partida sigue la siguiente secuencia: Anfibolitas > Granitos > Esquistos de la Serie de Órdenes > Pizarras > Esquistos de Villalba > Serpentinitas.

* En los suelos desarrollados sobre esquistos y esquistos de Órdenes se presenta una mayor adsorción en el horizonte A, mientras que en los suelos graníticos es el horizonte B el que presenta mayores índices de adsorción. No se encuentran diferencias en el caso de suelos desarrollados sobre anfibolitas.

* Los suelos próximos a la factoría presentan mayores índices de adsorción en las muestras tomadas a mayor profundidad (15 cm), debido a la mayor presencia de componentes minerales que contribuyen a este proceso.

* En los diferentes suelos de Galicia estudiados, los parámetros que afectan de forma más importante a la adsorción de flúor son: el pH en agua, el pH en fluoruro sódico, como indicador de presencia de materiales no cristalinos (hierro y aluminio extraídos con pirofosfato sódico y oxalato amónico) y el aluminio extraído con oxalato amónico ácido, que representa el total del aluminio no cristalino.

* En los suelos tomados en las proximidades de la factoría, la adsorción de flúor parece estar controlada por el contenido en arcilla, el contenido en aluminio de cambio así como el pH en agua.

* La adición de flúor produce un aumento significativo del pH en el equilibrio, el flúor total y libre, el aluminio total y reactivo, el contenido en materia orgánica en disolución, así como la concentración de sulfatos. Por otro lado, dada la mayor solubilidad de la sal de magnesio, su disminución puede estar también atribuida al aumento en la capacidad de intercambio catiónico como consecuencia de la existencia de arcillas de carga variable y de la ionización de la materia orgánica al aumentar el pH. Esta explicación se puede extender también al caso del potasio.

* El contenido de hierro y el zinc presentan una tendencia a aumentar a medida que se adiciona flúor. El manganeso no presenta un comportamiento claro al respecto. Otros elementos como el Calcio y el Magnesio disminuyen como consecuencia de la precipitación de CaF_2 y de MgF_2.

CARGAS CRÍTICAS DE CONTAMINANTES ÁCIDOS

(L. Rodríguez Lado y F. Macías)

El concepto de Carga Crítica deriva de ideas surgidas en Canadá en la década de los 60 sobre la determinación y utilización de una dosis tolerable o admisible de contaminantes en los ecosistemas naturales. Posteriormente esta idea fue retomada y utilizada en la reunión de Estocolmo de 1972 por investigadores escandinavos y, más tarde, en 1979, fue definida y admitida por la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UN-ECE), dentro del denominado *Convenio de Ginebra sobre Transporte a Larga Distancia y Transfronterizo de Contaminantes Atmosféricos (UN-ECE/CLRTAP).* La definición aceptada para la Carga Crítica de contaminantes Acidificantes es: ***la máxima deposición de compuestos acidificantes que no cause cambios químicos que, a largo plazo, provoquen efectos dañinos significativos sobre determinados ecosistemas sensibles, de acuerdo con los conocimientos actuales"***

Con este concepto se admite que los ecosistemas, y dentro de ellos algunos elementos, tienen diferencias importantes de sensibilidad respecto a los efectos causados por los diferentes contaminantes, por lo que las reducciones de emisiones pueden establecerse más adecuadamente en función de la prevención de esos efectos dañinos y no en reducciones arbitrariamente establecidas como se habían realizado anteriormente con las emisiones de S. Una vez establecidas las Cargas Críticas y conocidas las inmisiones es posible determinar la existencia o ausencia de excesos en una determinada zona y valorar la necesidad y urgencia de la toma de medidas de reducción en las emisiones. Asimismo, pueden estimarse los posibles efectos de los excesos acidificantes y realizar medidas preventivas.

El establecimiento de las Cargas Críticas de compuestos acidificantes de S y N fue muy rápido desarrollándose diferentes sistemas para su determinación que, en función de su complejidad fueron denominados, Sistemas de Nivel 0, 1 y 2. Los métodos de Nivel 0, los más sencillos, se basan en relacionar las observaciones empíricas acerca de la presencia de daños en una determinada zona con niveles de inmisión conocidos y factores ambientales como litología, altitud, tipo, reacción, espesor y uso del suelo..... Se desarrollaron fundamentalmente en Escandinavia donde el método propuesto por el Instituto Medioambiental de Estocolmo (SEI) fue el más desarrollado y admitido. Este método utiliza cuatro variables medioambientales para establecer la *"Sensibilidad Relativa de los Ecosistemas a la acidificación"*.

FACTOR	PESO	CATEGORÍA	PONDERACIÓN
Litología del material original	2	I.- Rocas poco alterables II.- Rocas fácilmente alterables	1 0
Tipo de suelo	1	I.- pH < 4,5 II.- pH > 4,5	1 0
Uso de suelo	3	I.- Bosques de coníferas II.- Matorral III.- Bosques caducifolios IV.- Cultivos	1 2/3 1/3 0
Precipitación	1	I.- > 1200 mm II.- < 1200 mm	1 0

Además de en los países nórdicos el Reino Unido lo ha utilizado como sistema básico para determinar sus cargas críticas. En Galicia se ha aplicado a la zona de afecciones potenciales más elevadas por la presencia de las Centrales Térmicas de As Pontes y Meirama.

Los métodos de Nivel 1 utilizan cálculos de equilibrio en condiciones estacionarias. En el propuesto por la UN-ECE para Europa se considera como Carga Crítica la derivada de la expresión: $\mathbf{Cl(Ac^{act}) = BCwe - Alk^{le}(crit)}$, donde $Cl(Ac^{act})$ = Carga Crítica de Acidez; BCwe = Tasa de alteración mineral y $Alk^{le}(crit)$ = alcalinidad de lavado crítica del suelo. Para su determinación en los suelos de Galicia se ha considerado el cálculo de la tasa de alteración utilizando el modelo adoptado por la UN-ECE y considerando la temperatura y espesor real de los suelos de cada celda o subcelda de la red EMEP y el límite crítico de pH establecido por la UN-ECE para las aguas de salida de los suelos.

Los métodos de Nivel 2 utilizan cálculos de equilibrio en condiciones dinámicas. Requieren un gran número de datos raramente disponibles por lo que hasta la fecha sólo se han utilizado en algunas zonas. Suiza y Alemania son los países en que se han utilizado más extensivamente mientras que en Galicia únicamente se han utilizado los datos disponibles en el entorno de la Central Térmica de As Pontes dentro de un ejercicio de calibración del modelo SAFE en el que también se utilizaron datos de Rötiboden (Suiza), Solling (Alemania), Ballyhooly (Irlanda), Klosterhede (Dinamarca) y Valday (Rusia) (Walse, C. et al, 1996).

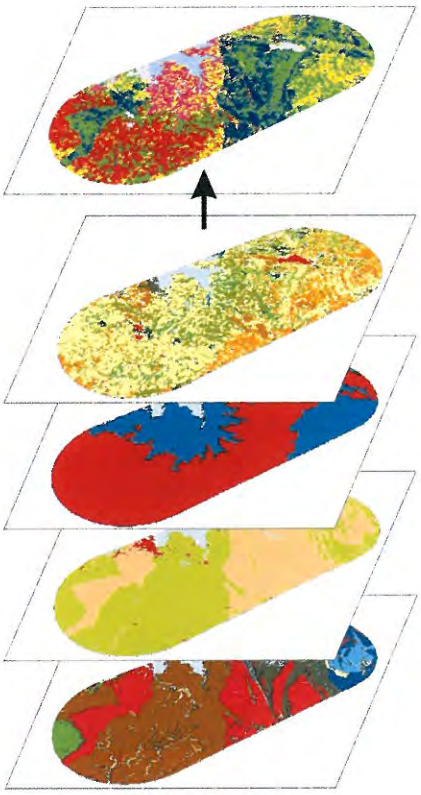


Figura 1.- Elaboración del mapa de sensibilidad relativa según metodología del SEI

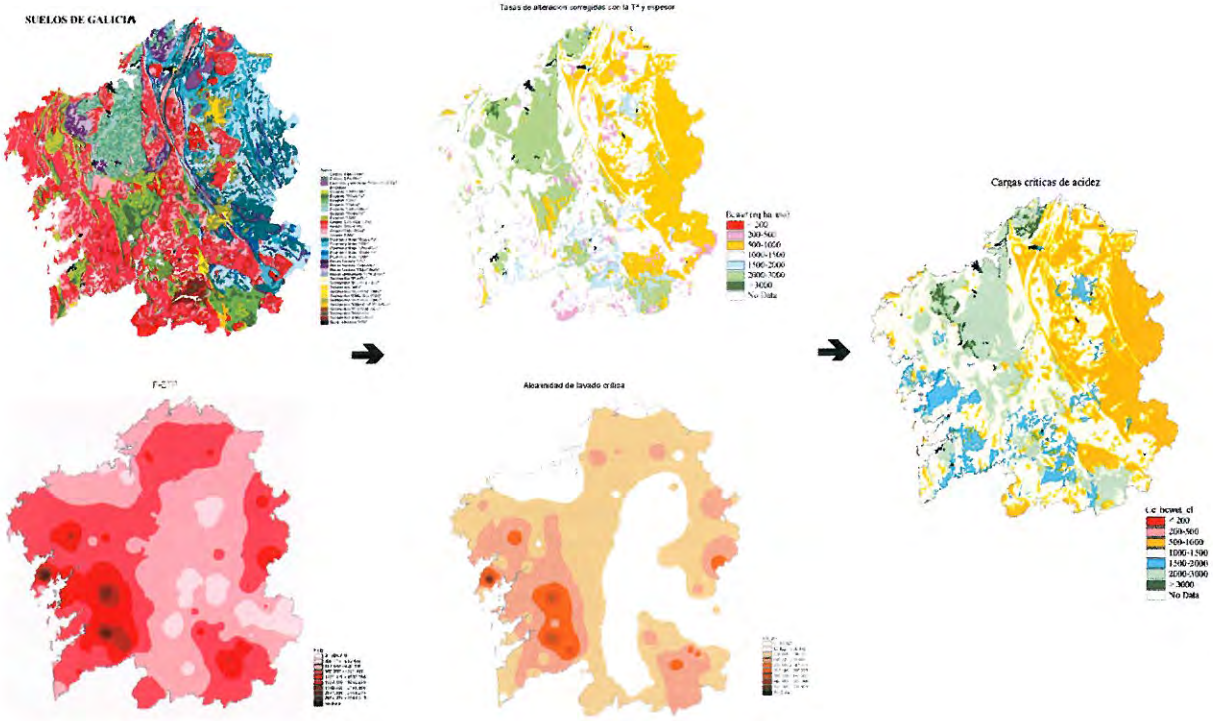


Figura 2.- Esquema de elaboración de las Cargas Críticas de Acidez (Nivel 1) para Galicia.

BALANCE CARGA CRITICA-DEPOSICION

En general, el cálculo de los posibles excesos de la carga crítica de acidez se realiza con los datos modelizados por la Red de Seguimiento de la Contaminación Europea (red EMEP) en función de las emisiones existentes y mediante la aplicación del modelo RAINS que tiene en cuenta la precipitación, difusión de las emisiones y circulación atmosférica, tiempo de oxidación del SO_2, etc. Los datos obtenidos no son adecuados para todos los lugares. Así en As Pontes se ha comprobado que sobreestima las deposiciones de S (x 4) y en menor medida de NO_x (x 1.7) (Lucas, 2000). Lo ideal sería disponer de datos medidos en estaciones de seguimiento de la contaminación atmosférica. En el caso de Galicia hay una red en torno a la Central de As Pontes con datos desde 1987 y en torno a la Central Térmica de Meirama con datos disponibles desde 1997. En 1998 comenzó a funcionar la Red de la Consellería de Medio Ambiente.

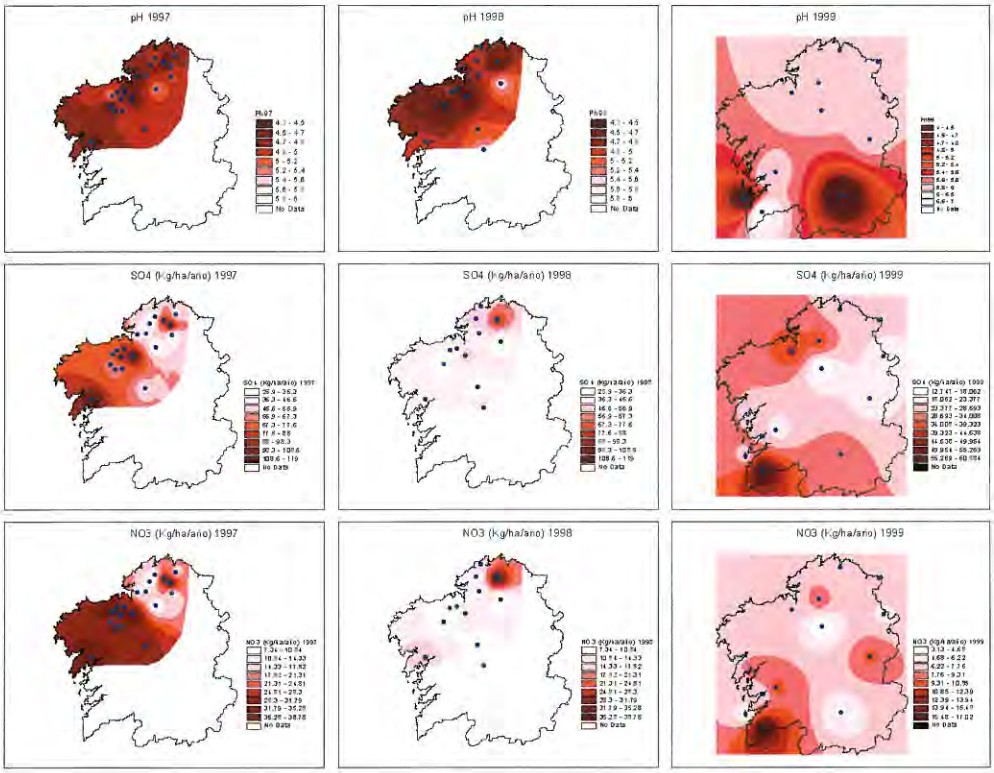


Figura 3.- Estimación de deposición a partir de las estaciones de seguimiento de la contaminación atmosférica.

Con los datos disponibles se ha realizado el balance para la celda 85,28 en el período 1987-97 encontrando que sólo los años 1993 y 1994 presentan zonas en las que se supera la carga crítica si se consideran exclusivamente los aportes de la deposición antrópica (eliminando los aportes marinos) y se tiene en cuenta la absorción por la vegetación de cationes básicos pero no de sulfatos y nitratos y su efecto de intercepción considerando la vegetación más extractiva, es decir las condiciones pésimas. Es importante destacar que la mayor parte de la acidificación potencial de los suelos no se debe al aporte de protones, sino a la entrada de cantidades importantes de $SO_4^=$, NO_3^- y NH_4^+, de ahí que las interacciones de estos iones, y en especial las del $SO_4^=$, con los suelos y los organismos vivos son muy importantes a efectos de determinar el riesgo real de acidificación.

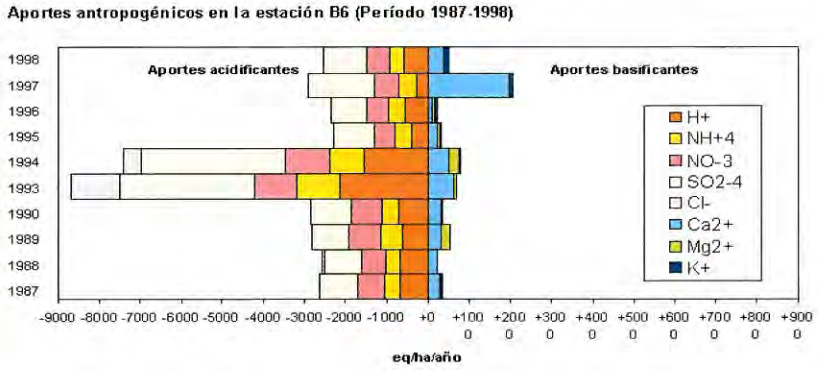


Figura 4.- Aportes antropogénicos en la estación B6 (1987-1998).

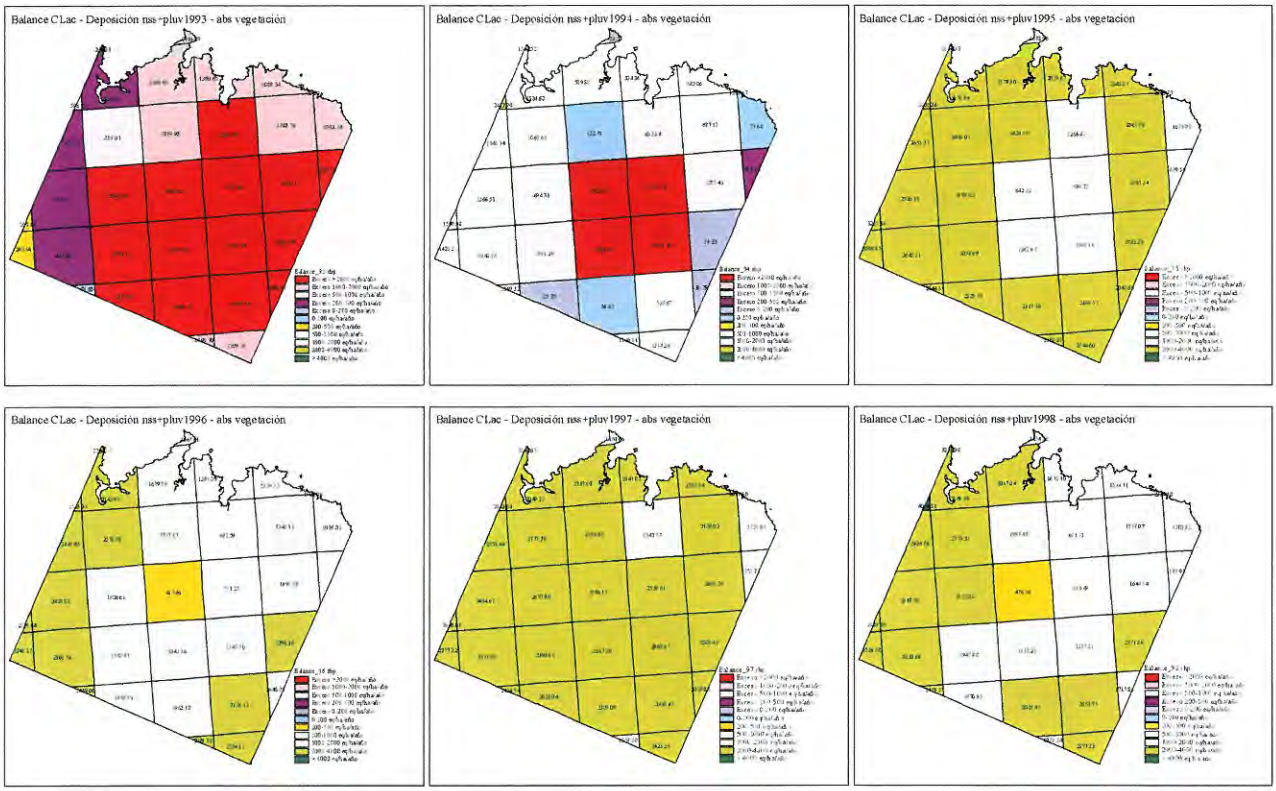


Figura 5.- Balances Carga Crítica/Deposición en la celda EMEP 85,28.

En general, los suelos de Galicia están bien protegidos contra la acidificación debido a la elevada tasa de alteración, al efecto de los aportes marinos y, sobre todo, a la acción neutralizante y adsorvente de los compuestos de aluminio reactivos. Por ello, y por las reducciones de las emisiones producidas y aceptadas por España (Directiva de Techos Nacionales, 2000) el objetivo de la Unión Europea de alcanzar el 50% de reducción en las zonas con exceso de Carga Crítica de Contaminantes y de no tener ninguna zona con exceso a partir del 2015 ya se ha cumplido para el S en toda España. Otra cosa es la acidificación y eutrofización que pueden provocar las inmisiones de compuestos nitrogenados o la situación respecto a las cargas críticas de contaminantes orgánicos persistentes, metales pesados (Hg, Cd y Pb) y O_3 cuya determinación y establecimiento de balances está mucho más atrasada.

LA ADSORCIÓN DE SULFATOS EN SUELOS DE GALICIA.

(M. Camps Arbestain, M.E. Barreal, F. Macías).

Los posibles efectos de una elevada deposición de SO_4^{2-} en los suelos incluye una acelerada acidificación del sistema con eliminación de cationes básicos y acídicos, y su pérdida en las aguas de drenaje, dando lugar con el tiempo a un descenso del pH y de la fertilidad del suelo. De ello se desprende que la actuación de mecanismos capaces de retener SO_4^{2-} en el perfil retrasará en parte los efectos negativos causados por la deposición atmosférica rica en estos iones. Se conocen distintos mecanismos de retención de SO_4^{2-} en el suelo: a) mecanismos inorgánicos como la precipitación de SO_4^{2-} y la adsorción de SO_4^{2-}, y b) mecanismos orgánicos como la absorción de SO_4^{2-} por parte de las plantas, así como por los microorganismos del suelo. El mecanismo mediante el cual se adsorbe SO_4^{2-} no se conoce con detalle pero se asume de forma general que se produce mediante un intercambio de ligandos (adsorción específica).

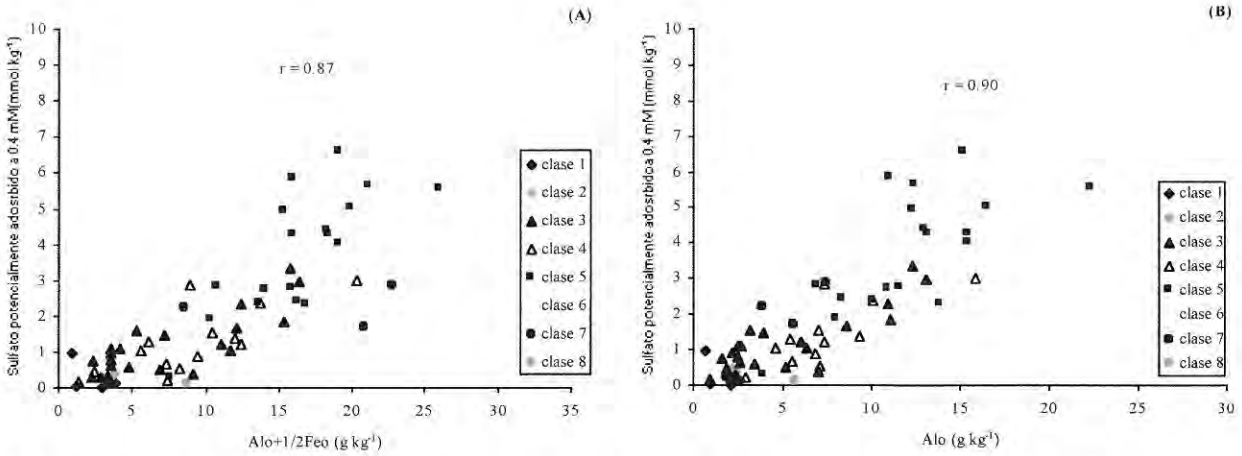


Fig. 1.- Adsorción de SO_4^{2-} en horizontes superficiales de suelos de Galicia vs. (A) Al_o+1/2Fe_o y (B) Al_o. Las clases 1 y 2 incluyen suelos derivados de materiales ricos en cuarzo y pobres en Al y Fe (cuarcitas y areniscas) con tendencia podsólica. En las clases 3 y 4 estarían los denominados "suelos alumínicos". Las clases 5-6 incluyen suelos con propiedades ándicas. Las clases 7 y 8 corresponden a suelos desarrollados sobre serpentinitas y materiales calcáreos (Camps Arbestain y col., 1999a).

La adsorción de SO_4^{2-} en suelos está principalmente asociada a óxidos e hidróxidos de Fe y Al (Fig. 1) (Camps Arbestain y col., 1999a), tanto amorfos como cristalinos y, también, a aluminosilicatos de bajo grado de orden, como alofanos, imogolitas e incluso haloisitas o caolinitas desordenadas, todos ellos caracterizados por tener cargas superficiales variables. Estos compuestos pueden aparecer en muchos tipos de suelos, especialmente en suelos derivados de materiales ricos en Al y Fe en los que las condiciones de alteración son rápidas e intensas. La adsorción de SO_4^{2-} aumenta cuando se incrementa la concentración de SO_4^{2-} y desciende el pH (Fig. 2) (Camps Arbestain y Macías, 2000).

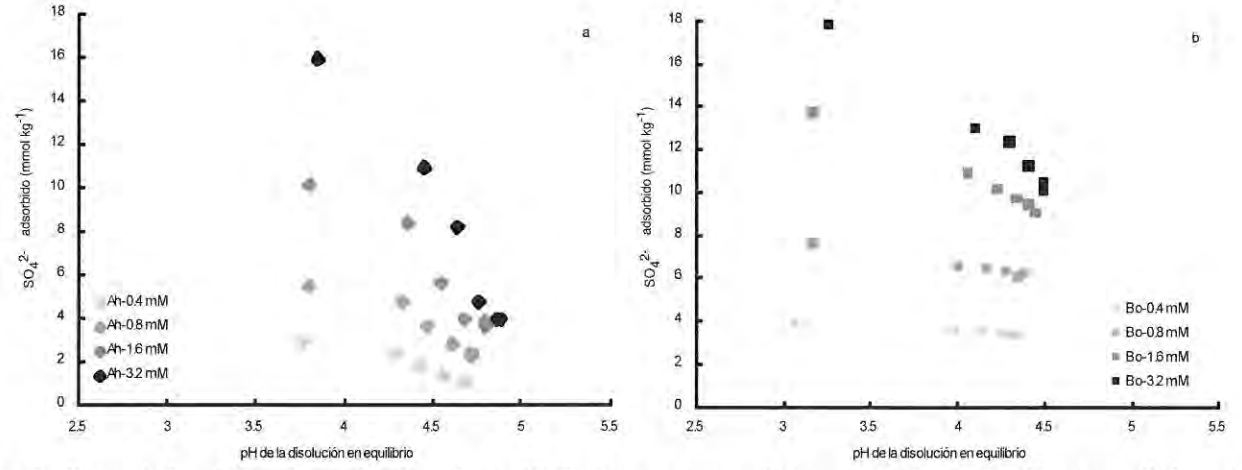


Fig. 2.- Efecto de la acidificación en la adsorción de SO42- de un horizonte fúlvico y un horizonte ferrálico desarrollados sobre anfibolitas (Boqueixón, Santiago) (Camps Arbestain y Macías, 2000).

En presencia de ácidos orgánicos libres la adsorción de SO_4^{2-} suele decrecer al competir éstos con el SO_4^{2-} por las superficies de adsorción (Fig. 3), por lo que la adsorción de SO_4^{2-} tiende a ser menor en los horizontes superficiales (Fig. 4) (Camps Arbestain y col., 2001; Barreal y col., 2001). No obstante, la adsorción puede ser importante en horizontes superficiales ricos en complejos organoalumínicos, como es el caso de los suelos con propiedades ándicas (Fig. 1 y 4) (Camps Arbestain y col., 1999a, 1999b).

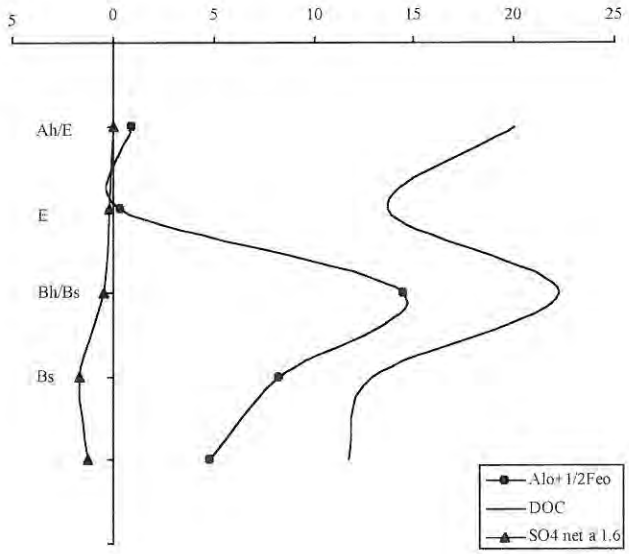


Fig. 3.- . Adsorción de SO_4^{2-} en un podzol de Ferreira (Lugo) (Typic Haplorthod), $Al_o+1/2Fe_o$ y concentración de DOC en la disolución de equilibrio. (Camps Arbestain y col., en revisión).

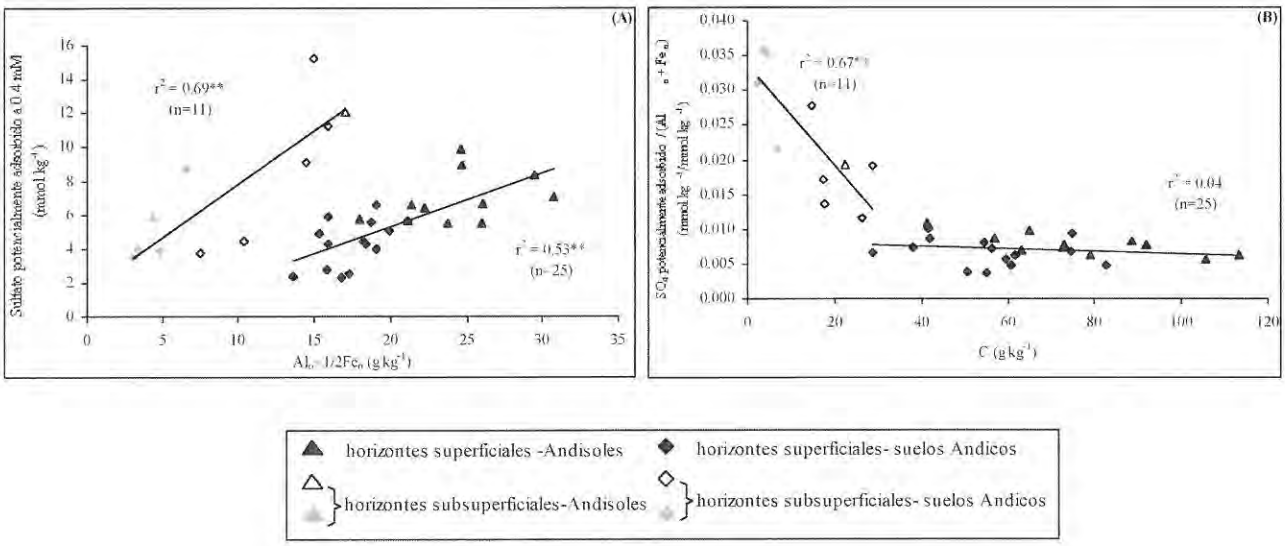


Fig. 4.- (A) Adsorción de SO_4^{2-} en suelos con propiedades ándicas de Galicia vs. $Al_o+1/2Fe_o$. (B) Adsorción de SO_4^{2-} en suelos con propiedades ándicas por unidad de (Al_o+Fe_o) [(mmol kg^{-1})/(mmol kg^{-1})] vs. Contenido de C orgánico (Camps Arbestain y col., 2001).

Por otro lado, la adsorción de este anión es un proceso dependiente de la concentración (Fig. 5) (Camps Arbestain y col., 1999c; Macías y col., 2001) y, como tal, se ve influido por la diferencia de concentraciones de SO_4^{2-} existentes entre la disolución entrante y la concentración de la disolución con la que el suelo se encontraba previamente en equilibrio.

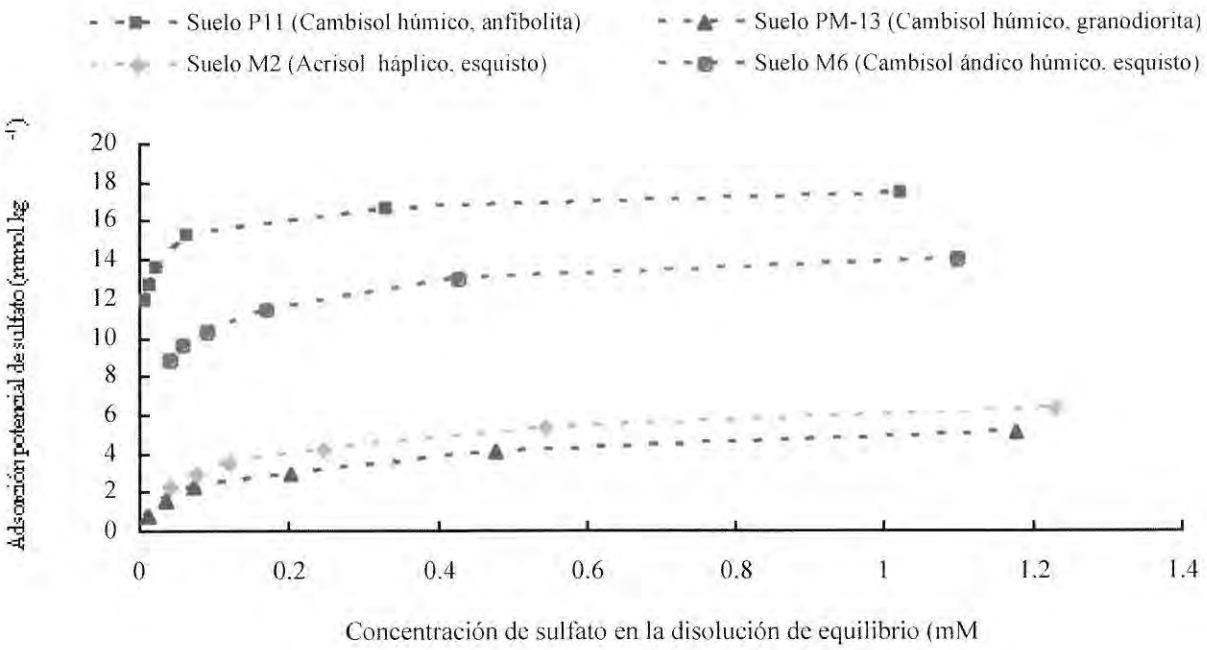


Fig. 5.- ***Isotermas de adsorción de sulfatos a pH 3.0 en varios tipos de suelos (Macías y col., 2001).***

De todo lo mencionado se deduce que la adsorción de SO_4^{2-} en suelos va a ser importante en suelos ácidos con predominio de carga variable. Dado que este mecanismo incrementa la resistencia de dichos suelos a la acidificación por aportes atmosféricos se considera necesario su inclusión en el cálculo de la Carga Crítica de Acidez (Tabla 1) (Macías y col., 2001).

Tabla 1.- Comparación de la capacidad de adsorción de sulfatos y la Carga Crítica de Acidez obtenida para distintos tipos de suelos (Macías y col., 2001).

Mat original	Suelo	Ads SO_4^{2-} (eq/ha)	C Crítica (eq/ha)
Granitos	Leptosoles	12520	487-3684
	Regosoles	16700	1137-4289
	Cambisoles	42300-69120	1137-4289
Esquistos	Leptosoles	25120	2788-3332
	Regosoles	33500	2788-3332
	Cambisoles	102720	4061-4559
R básicas	Leptosoles	13880	1010-1190
	Andosoles someros	43420	3030-3566
	Andosoles profundos	251780	4487
	Cambisoles	113760-149580	4569-5674

EFECTOS DE LA DEPOSICIÓN ÁCIDA SOBRE SUELOS Y AGUAS SUPERFICIALES DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO SOR.

E. García-Rodeja Gayoso, V. Fernández Vega
Departamento de Edafología y Química Agrícola. Facultad de Biología. USC E-15706, Santiago de Compostela, España

Los óxidos de nitrógeno y azufre, emitidos a la atmósfera como consecuencia del empleo de combustibles fósiles, han provocado el incremento de la entrada de componentes ácidos en los medios edáficos con las consiguientes variaciones químicas tanto en la fase sólida como en la disolución de los suelos y en las aguas superficiales. El aporte de protones y aniones de ácidos inorgánicos provenientes de la atmósfera acelera los procesos naturales de acidificación y conduce a cambios en los suelos, tales como una acelerada pérdida de cationes básicos, el aumento del Al y otros metales en disolución, la acumulación de sulfato y en último término, el descenso del pH, acompañados de la transferencia de acidez a las aguas superficiales.

La mayoría de los estudios sobre los efectos de los aportes ácidos atmosféricos se han desarrollado en bosques de coníferas de regiones frías, donde la temperatura media anual es generalmente inferior a 5ºC. Dada la relación existente entre los procesos biogeoquímicos y la temperatura es importante conocer los efectos de la deposición atmosférica en regiones con diferentes condiciones climáticas, especialmente porque los resultados obtenidos en estos estudios se suelen extrapolar a otras regiones en las que, a causa de las diferentes condiciones ambientales, cabe esperar diferencias en la naturaleza y las velocidades de los procesos que contribuyen a contrarrestar los efectos de las cargas de acidez de origen antrópico.

Localización de la cuenca del Sor.

Localización de la cuenca alta del río Sor.

El año 1991, se inició el desarrollo del denominado Proyecto 'Sor', financiado por ENDESA, que posteriormente se incorporó al proyecto 'Development of Assesment of Monitoring Techniques at Integrated Monitoring Sites in Europe' (Proyecto LIFE95/FIN/A11/EPT/387). Actualmente, con financiación de la Xunta de Galicia, se continua trabajando en esta cuenca. Los principales objetivos del estudio son: identificar los efectos de la deposición ácida, establecer los principales mecanismos de neutralización de ácidos que actúan en la cuenca, determinar las cargas críticas de acidez, e identificar los principales problemas que pueden surgir de la aplicación de modelos dinámicos de acidificación

La Cuenca Alta del Sor

La superficie de la cuenca alta es de unos 20 km^2, con altitudes que varían entre los 820 m, en Montouto y los 360 m, donde se cierra la zona estudiada. A 20 km al SO está situada la central térmica de As Pontes que genera una alta carga de azufre de origen antrópico en el área. La mayor parte de los materiales geológicos de la cuenca pertenecen a la denominada Zona Centroibérica, en la que afloran materiales Paleozoicos, Ordovícicos y Silúricos pertenecientes al Dominio del Ollo de Sapo, representados por filitas con niveles de esquistos y cuarcitas; en la parte norte aparecen esquistos Precámbricos de la Serie de Vilalba y, además, existen dos pequeños afloramientos de granitos de dos micas. Las vertientes están cubiertas por depósitos coluviales que mezclan los materiales geológicos mencionados.

El clima puede caracterizarse como templado húmedo, con una precipitación media anual de 1655 mm; la estación más lluviosa es el invierno y la más seca el verano, primavera y otoño presentan valores muy similares. La temperatura media anual es de 11.4ºC, el mes más frío es Enero, con una media de 7ºC y el más cálido Agosto, con 17ºC. Los suelos presentan un régimen de humedad údico y un régimen de temperatura mésico. La vegetación natural está constituida por bosques mixtos de roble y abedul, alisedas y matorrales (brezales y tojales), pero en una extensión importante la vegetación natural ha sido reemplazada por praderas y bosques de repoblación, fundamentalmente de *Pinus sylvestris*. Los bosques caducifolios, que cubren un 18% de la superficie de la cuenca, están formados principalmente por robles (*Quercus robur*) y abedules (*Betula alba*). Los matorrales son la comunidad más ampliamente extendida en la zona (cubren un 60% de la superficie), tienen como especies más representativas *Ulex gallii* y *Erica mackaiana*, *Daboecia cantabrica* y *Calluna vulgaris*. Los pinares (14% de la superficie) se localizando fundamentalmente en las áreas más elevadas, con pendientes moderadas; los más ampliamente extendidos son los de *Pinus sylvestris*, en ocasiones acompañados de *Pinus pinaster*. Prados y cultivos se asocian a las casas aisladas y a pequeños núcleos de población en zonas de pendiente moderada ocupando un 8% del territorio. Los tipos de suelos más representativos son *Regosoles úmbricos* y *Cambisoles húmicos*. Los suelos de perfil AR, *Leptosoles úmbricos* y *Leptosoles líticos*, se encuentran ligados a laderas de pendiente muy

pronunciada en las que han tenido lugar procesos erosivos importantes y en las áreas de cumbre de las cuarcitas. En las zonas de cima y laderas convexas, de pendiente moderada dominan *Regosoles* y *Cambisoles*, con frecuentes inclusiones de *Leptosoles úmbricos*. En las áreas más llanas, en las laderas convexas y en las vertientes más inclinadas que conservan la vegetación natural dominan los *Cambisoles húmicos* (fase profunda), a los que con frecuencia se asocian suelos que presentan rasgos de hidromorfía (*Cambisoles gleicos* y *Gleisoles úmbricos*). En las zonas de fondo de valle y en las cabeceras de los afluentes y del propio río Sor existen áreas en las que dominan suelos cuya génesis está condicionada por la hidromorfía, *Histosoles fíbricos* y *Gleisoles úmbricos*.

Composición de la deposición atmosférica. Precipitación y pluviolavado

El flujo de iones bajo la copa de un árbol es la resultante de la combinación de dos flujos de deposición, la deposición por precipitación y la deposición por intercepción y del efecto fuente/sumidero de la copa.. Para el estudio de la composición de la deposición y el pluviolavado en la cuenca alta del río Sor se establecieron 4 parcelas permanentes, dos en bosques caducifolios (Sanche y Santar) y dos en pinares de *Pinus sylvestris* (Piocorto y Campos). Los resultados que se presentan corresponden al período de toma de muestra entre noviembre 1991-octubre 1993. El pH medio de la lluvia es 4.40, con valores mínimos en torno a 3.80, el predominio de los iones Cl^- y Na^+ en la lluvia indica la fuerte influencia marina en el área. La deposición total de azufre está controlada por el componente antrópico (77% en la precipitación; 78-82% en los pluviolavados de los bosques caducifolios; 86-91% en los pinares), reflejando la influencia de la central térmica situada en las cercanías de la cuenca.

En la mayor parte de los casos la interacción de la lluvia con el dosel de los bosques se traduce en un descenso del pH, las concentraciones de NO_3^- en los pluviolavados son similares o ligeramente más altas que en la lluvia y están claramente enriquecidos en otros iones, fundamentalmente SO_4^{2-}, K^+, Ca^{2+} y Mn^{2+} y en COD. La comparación entre los flujos de precipitación y pluviolavado muestra un incremento en todos los iones, excepto el NO_3^-, bajo las copas de los árboles, mayor en los pinares que en los bosques caducifolios, como consecuencia de la intercepción de deposición seca y oculta. En general el grado de acidificación del pluviolavado, en comparación con la lluvia, parece más dependiente de la situación de la parcela (en particular de la altura a la que se encuentra) que de las características de la vegetación, probablemente a causa de la intercepción de aniones de ácidos fuertes de la niebla y las nubes a mayores altitudes. El lixiviado de copa, la componente interna del flujo de pluviolavado es especialmente importante para iones como K^+, Ca^{2+} y Mn^{2+}, mientras que en las copas parece producirse absorción de NO_3^-. La deposición atmosférica de Mg^{2+} parece ser una fuente más importante de este catión que el lixiviado foliar ya que las relaciones lluvia/pluviolavado para este catión son más parecidas a las del SO_4^{2-} y del Cl^-.

Tabla I. Composición de la precipitación y los pluviolavados (medias ponderadas, mg L^{-1})(Nov.1991-Oct.1993)

	Precipitación	Pluviolavado bosques caducifolios		Pluviolavado pinares	
	Cuenca del Sor	Santar	Sanche	Campos	Piocorto
PH	4.40	4.72	4.19	4.11	3.86
H^+	0.040	0.019	0.064	0.078	0.140
$SO_4^=$	4.50	6.58	10.54	15.26	18.10
$*SO_4^=$	3.47	5.16	8.70	13.13	16.41
NO_3^-	1.20	1.06	0.77	2.31	1.37
Cl^-	6.66	9.41	11.90	12.93	9.66
Ca^{2+}	0.35	1.06	1.10	1.34	1.25
Mg^{2+}	0.43	0.68	0.90	1.14	0.82
Na^+	3.47	4.78	5.94	6.40	5.05
K^+	0.37	2.22	2.41	4.22	3.65
NH_4^+	0.34	0.78	0.46	0.95	0.79
Si	0.021	0.031	0.032	0.036	0.070
Zn	0.023	0.025	0.031	0.044	0.037
Mn	0.015	0.134	0.345	0.085	0.115
COD	1.37	5.52	5.07	7.77	8.59

Tabla II. Flujos de precipitación y pluviolavado (kg ha^{-1} y^{-1}). ($*SO_4^{2-}$: sulfato no marino)

Precipitación										
$SO_4^=$	$*SO_4^=$	NO_3^-	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	NH_4^+	Mn	H^+
69.4	56.6	15.6	78.5	4.4	5.0	40.7	5.0	6.1	0.32	0.68
Pluviolavado en bosques de hoja caduca										
	$SO_4^=$	NO_3^-	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	NH_4^+	Mn	H^+
Santar	79.9	11.2	99.4	12.4	7.6	51.3	29.6	10.3	1.5	0.21
Sanche	139.6	7.3	121.7	13.0	10.0	62.8	32.1	6.3	0.80	0.93
Pluviolavado en pinares										
Campos	148.5	15.7	106.6	13.2	10.2	53.5	42.8	7.3	0.88	0.87
Piocorto	278.4	16.9	125.6	21.4	12.6	69.2	59.2	10.8	1.9	2.0

Aguas de arroyos

Durante el período de estudio se tomaron muestras mensualmente de las aguas del cauce principal y de algunos arroyos de la cuenca alta del río Sor. Las aguas de los arroyos son menos ácidas que los pluviolavados y que la disolución de los suelos, su composición química refleja también la influencia marina (Cl^- y Na^+ son los iones más abundantes y la relación Cl/Na está en el rango de la de las aguas marinas), aunque también tienen concentraciones relativamente altas en Ca^{2+} y SO_4^{2-}. Aunque el SO_4^{2-} es el ion de origen antrópico dominante, la contribución del NO_3^- a la carga ácida total es importante en alguno de los afluentes (entre un 10% en Sanche y un 25% en Foxo). El arroyo de Santar es el más ácido y más rico en Al de los estudiados. Las diferencias entre las salidas de las diferentes subcuencas se relacionan, fundamentalmente, con la litología local y el tipo de vegetación dominante.

Tabla III. Composición de las aguas de los arroyos (mg L^{-1}), R5S: salida de la cuenca alta del río Sor; R8Se(Sanche), R10F(Foxo) y R17Xa (Santar): salidas de las subcuencas.

	R5S	*R8Se*	*R10F*	*R17Sa*
pH	7.06	6.82	6.39	5.43
$SO_4^{=}$	5.67	5.82	4.5	5.89
NO_3^-	1.04	0.55	1.38	0.96
Cl^-	8.89	8.21	8.95	9.13
Ca^{2+}	3.80	2.61	2.05	1.02
Mg^{2+}	1.24	1.04	1.02	0.92
Na^+	5.15	4.75	5.01	5.26
K^+	0.47	0.27	0.31	0.35
Si	1.69	1.68	1.28	1.38
AlT	0.045	0.037	0.047	0.168
Alc	0.135	0.078	0.044	0.003
COD	0.69	0.86	0.76	0.93

Los suelos

Se estudiaron 8 suelos, bajo diferente tipo de cubierta vegetal. Entre ellos se incluyen aquellos de las estaciones donde se ha realizado el seguimiento del agua de lluvia y del pluviolavado: bajo *Pinus sylvestris* (**PS**) y *Pinus pinaster* (**PP**) en Piocorto, bajo *Pinus sylvestris* en Campos (**CS**), bajo bosque caducifolio en Santar (**XB**) y Sanche (**SB**), así como otros tres suelos que abarcan situaciones no consideradas anteriormente: un suelo bajo pradera en Santar (**XP**) y dos con vegetación de brezal (**SC** y **MO**).

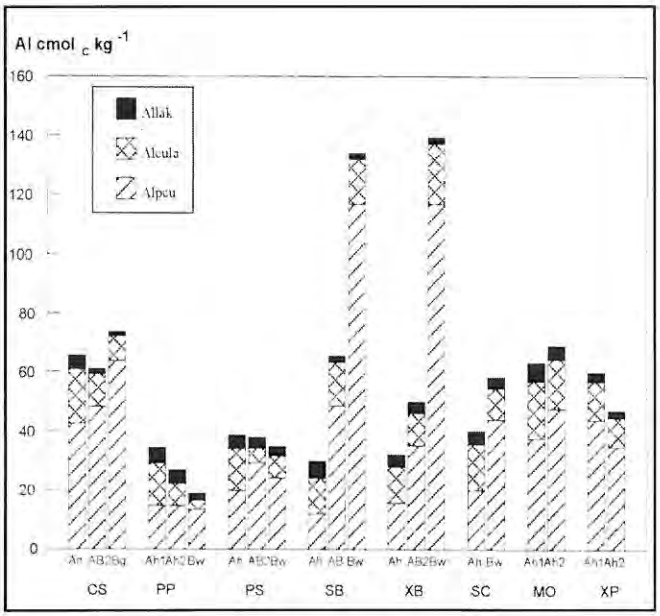
Se trata de suelos desarrollados a partir de depósitos de ladera, de potencia variable, constituidos fundamentalmente por filitas y con proporciones variables de cuarcita y esquistos de la Serie de Vilalba, salvo el perfil MO, desarrollado a partir de un depósito coluvial de pizarras situado sobre granito arenizado. La pedregosidad superficial es escasa a moderada y, salvo en el caso del perfil de Campos (CS), no existen afloramientos rocosos. El drenaje es bueno a moderadamente bueno, exceptuando de nuevo el perfil CS, que presenta condiciones de hidromorfía. Las texturas dominantes son franco limosas, con contenidos en arcilla entre el 20 y el 25% y con el limo fino como fracción dominante. Son ricos en materia orgánica, con contenidos entre 15 y 20% en los horizontes superficiales, y ácidos, con valores de pH en agua generalmente inferiores a 4.5, y, a veces, inferiores a 4.0. En todos los suelos el pH aumenta hacia los horizontes subsuperficiales, pero en ningún caso se alcanzan valores superiores a 5 en agua y a 4.2 en KCl. El catión más abundante en el complejo de cambio de todos los suelos es el Al, especialmente en los horizontes superficiales (0-10 cm) y, excepto en el perfil XP, ocupa más del 60% de las posiciones de cambio, siendo frecuentes porcentajes de saturación en Al superiores al 80%. Los horizontes superficiales (0-10 cm) muestran valores de CICe entre 2.1 y 9.2 $cmol_c\ kg^{-1}$, apreciándose un descenso con la profundidad. Respecto a los cationes básicos, la secuencia de abundancia es: Ca>Mg>K>Na, pero en cantidades muy pequeñas en comparación con el Al; así, en la mayor parte de los horizontes superficiales (0-10 cm) la suma de cationes básicos es inferior a 2 $cmol_c\ kg^{-1}$, especialmente en los suelos bajo pinar (CS, PS y PP). En los horizontes subsuperficiales (>10 cm) los valores se encuentran por debajo de 1 $cmol_c\ kg^{-1}$ en la mayoría de los casos.

Disolución del suelo.

Debido a la lentitud de muchos procesos edáficos y a la complejidad propia de cada sistema (tipo de material geológico y de vegetación, grado de evolución alcanzado por el suelo etc.), el estudio de la fase sólida no siempre permite detectar posibles efectos de los impactos ácidos. En este sentido el análisis de la disolución del suelo parece el más adecuado, dado que esta fase responde con mayor rapidez a los cambios medioambientales. La recogida de muestras para obtener la disolución del suelo se realizó de forma mensual en los suelos PS, CS, XB y SB y estacionalmente en los restantes.**Tabla III**. Propiedades seleccionadas de los suelos. Suelos de pinar (PS, CS, PP), suelos de bosque caducifolio (SB, XB), suelos de matorral (MO, SC), suelo de pradera (XP).

Suelo	Hor.	pH H_2O	pH KCl	M.O. %	Catb	Al cmol$_c$kg^{-1}	CICe	Sat Al %
PS	Ah	4.22	3.65	16.77	1.02	3.53	4.69	77
	AB	4.33	3.84	8.72	0.51	2.94	3.45	85
	2Bw	4.35	3.77	5.08	0.48	2.80	3.28	85
CS	Ah	4.35	3.77	17.67	1.17	3.49	4.90	74
	AB	4.58	4.07	7.00	0.65	2.43	3.08	79
	2Bg	4.60	4.10	4.39	0.54	1.91	2.45	78
PP	Ah1	3.87	3.38	20.86	1.31	4.32	6.85	77
	Ah2	4.11	3.68	10.17	0.74	3.30	4.23	82
	Bw	4.25	3.68	4.15	0.51	2.33	2.84	82
SB	Ah	3.74	3.02	17.53	1.55	6.82	9.20	89
	AB	4.01	3.55	9.91	0.68	5.68	6.87	83
	Bw	4.34	3.92	8.93	0.51	3.88	4.39	88
XB	Ah	4.11	3.23	20.95	2.90	5.58	9.04	62
	AB	4.52	3.94	6.93	0.79	3.48	4.27	82
	2Bw	4.70	4.19	5.20	0.71	2.17	2.88	75
MO	Ah1	4.38	3.68	15.51	1.55	3.52	5.49	64
	Ah2	4.59	3.88	9.06	0.76	3.22	3.98	81
SC	Ah	4.32	3.59	18.96	1.48	5.52	7.32	75
	Bw	4.51	3.75	4.60	0.66	2.99	3.99	75
	BC	4.93	4.17	2.12	0.41	1.65	2.06	80
XP	Au1	4.83	4.13	7.84	2.51	1.27	3.78	34
	Au2	4.84	4.03	5.80	1.47	1.98	3.45	57

pH: en agua (relación suelo:disolución 1:2.5); Catb: cationes básicos; Al: Al en KCl; CICe: capacidad de intercambio catiónica efectiva; Sat Al: porcentaje de Al en el complejo de cambio; M.O: contenido en materia orgánica.



Formas de Al en la fase sólida. A*llak*: Al*la*-Alk (complejos organoalumínicos de menor estabilidad). Al*cula*:Alcu-Alla (complejos organoalumínicos de estabilidad media); Al*pcu*; Al*p*-Al*cu*: (complejos organoalumínicos de fuerte estabilidad)

Las disoluciones de los horizontes superficiales (0-10cm) muestran pH ácido (alrededor de 4.5) y bajo contenido en cationes básicos, de los que el Na^+ es el más abundante, algo común en los suelos de Galicia. Las concentraciones de Ca^{2+} y Mg^{2+}, generalmente inferiores 70 µmol L^{-1}, son muy similares en los distintos epipedones. Las concentraciones de K^+ y, especialmente de NH_4^+, son más altas en los horizontes superficiales bajo bosque caducifolio. En los horizontes subsuperficiales (>10 cm) disminuyen las concentraciones de cationes básicos y NH_4^+, excepto en el caso del Na^+, que varía poco a lo largo del perfil, posiblemente debido a que es poco retenido por la fase sólida del suelo e interviene escasamente en el ciclo de nutrientes. Las concentraciones medias de SO_4^{2-} en los horizontes superficiales se encuentran entre 150 y 380 µmol L^{-1}. Los contenidos de carbono orgánico disuelto (DOC) son especialmente altos en los suelos bajo especies caducifolias (XB y SB) y bajo *Pinus pinaster* (PP), aunque están dentro del rango encontrado en otros suelos forestales de la zona templada. Las concentraciones de NO_3^- presentan amplias variaciones en las disoluciones de los horizontes superficiales, tendiendo a ser más bajas para suelos que soportan matorral (<4 µmol L^{-1}) que en los de bosque (19-190 µmol L^{-1}). Entre los metales, destacan únicamente las concentraciones relativamente altas de Zn^{2+}, las de Mn^{2+} son ligeramente inferiores, las de Cu no superan los 0.15 µmol L^{-1} y las de Ni y Pb son incluso más bajas. La composición química de las disoluciones de los suelos de la cuenca del Sor refleja la influencia de los aportes atmosféricos, tanto marinos como antropogénicos. La alta concentración de Cl^- y de Na^+ puede ser explicada por la proximidad de esta región al mar; así, los dos iones están claramente correlacionados, particularmente en las disoluciones de los horizontes superficiales (r=0.75, p<0.001), y la relación molar Cl/Na es en la mayoría de los horizontes similar a la encontrada en el agua de mar (alrededor de 1.2). Otras características destacables de estas disoluciones son los relativamente altos contenidos de SO_4^{2-} y la abundancia de Zn^{2+} entre los metales. Las mayores concentraciones de SO_4^{2-} se obtienen en las disoluciones de suelos bajo bosque, hecho que se puede relacionar con la mayor intercepción de la deposición.

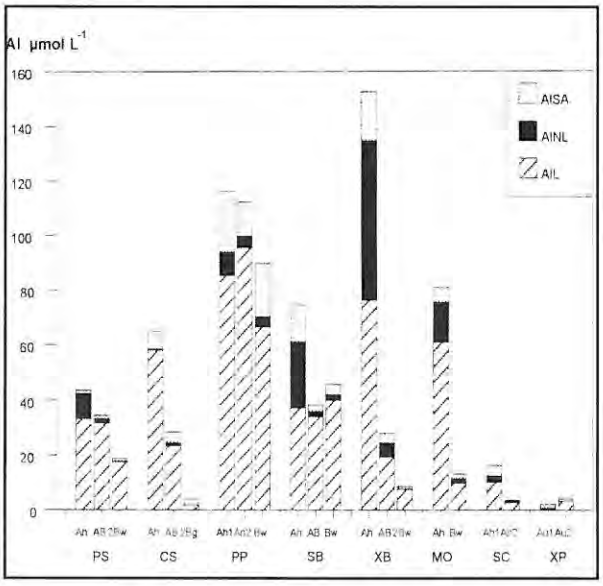
El Al total en disolución, presenta concentraciones medias en general altas en los horizontes superficiales en concordancia con el bajo pH, y una clara tendencia a disminuir con la profundidad. Las mayores corresponden a los suelos XB (bosque caducifolio) y PP (pinar) con valores superiores a 100 µmol L^{-1}, las menores, inferiores a 10 µmol L^{-1} corresponden a los perfiles MO (bajo brezal) y XP (bajo pradera). En general, estas concentraciones son más altas que las citadas para suelos de bosque, excepto en los de regiones muy contaminadas. El fraccionamiento del Al*T* revela que dominan claramente las formas monoméricas inorgánicas de Al (Al*L*) representando entre el 50% y el 90 % del Al*T*, encontrándose las mayores proporciones en los horizontes subsuperficiales (>10 cm). Un pequeño porcentaje de Al en disolución está unido a la materia orgánica, bien como polímeros, complejos y/o coloides (Al*SA*), o como monómeros (Al*NL*). Los porcentajes más elevados de Al*NL* nunca superan el 40 % y se obtienen en los horizontes superficiales bajo frondosas (SB y XB).

Tabla IV. Composición media de la disolución de los suelos (µmol L^{-1})

PERFIL	pH	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	NH_4^{+}	SO_4^{2-}	Cl^{-}	NO_3^{-}	Si	Mn	Zn
PS Ah	4.4	50.0	41.1	313.0	64.1	214.4	197.9	539.5	129.0	103.5	2.90	2.11
AB	4.8	32.5	32.9	317.3	30.7.	56.6	104.1	344.6	127.4	75.0	0.87	1.60
2Bw	4.5	30.0	28.8	265.2	30.7	57.2	93.7	302.2	124.1	60.7	0.41	1.62
CS Ah	4.5	45.0	78.1	604.3	100.2	122.2	302.0	1002.8	19.3	139.2	1.74	2.95
AB	5.2	25.0	53.4	473.9	30.7	58.3	145.8	536.7	38.7	85.7	1.05	0.91
2Bg	5.5	47.5	53.4	500.0	30.6	52.7	114.5	629.9	35.4	67.8	0.96	1.68
PP Ah1	4.2	97.5	49.3	330.4	64.1	200.0	322.9	502.8	187.0	121.4	2.00	3.39
Ah2	4.2	60.0	49.3	321.7	33.3	90.0	187.5	389.8	382.2	57.1	1.18	2.17
Bw	4.2	65.0	41.1	343.4	25.6	90.0	166.6	336.1	340.3	53.5	1.00	2.52
SB Ah	4.4	60.0	69.9	443.4	84.6	241.6	239.5	564.9	129.0	118.8	0.96	1.77
AB	4.4	37.5	61.7	439.1	33.3	71.1	135.4	485.8	262.9	75.0	0.76	1.85
Bw	4.6	30.0	53.4	395.6	25.6	55.0	177.0	485.8	275.8	64.2	1.81	1.65
XB Ah	4.4	135.0	144.0	521.7	358.9	360.0	385.4	1062.1	22.5	171.4	4.27	3.56
AB	5.0	40.0	65.8	369.5	135.8	55.5	166.6	720.3	62.9	50.0	2.25	1.33
2Bw	5.3	42.5	61.7	369.5	153.8	45.0	145.8	497.1	90.3	35.7	1.41	1.71
MO Ah1	5.6	62.5	53.4	347.8	130.7	167.7	156.2	548.0	1.60	89.2	1.03	1.92
Ah2	5.7	42.5	37.0	247.8	53.8	66.1	93.7	296.6	6.4	46.4	1.05	1.80
SC Ah	4.7	60.0	49.3	295.6	125.6	173.3	250.0	460.4	3.2	71.4	0.65	2.01
Bw	5.2	45.0	37.0	269.5	43.5	24.4	104.1	305.0	1.0	28.5	0.49	1.17
XP Au1	6.6	75.1	55.1	386.9	86.9	192.2	156.5	747.5	36.9	37.5	23.1	0.79
Au2	6.3	42.9	37.8	423.0	53.5	27.7	67.39	284.2	169.1	37.6	4.3	0.84

Tabla V. Al, F y COD en disolución. Concentración media y especiación de Al lábil (µmol L^{-1})

Perfil	AlT	COD	COD:Al	F^{-}	Al-F	Al-OH	Al-SO_4	Al^{3+}
PS Ah	40.7	1750.0	43.9	89.1	14.4	6.6	1.2	6.5
AB	30.0	416.6	20.2	19.2	11.7	6.0	0.8	8.4
2Bw	23.7	333.3	14.8	29.1	12.5	2.9	0.3	3.4
CS Ah	64.8	666.7	20.9	167.0	28.6	4.6	6.0	9.9
AB	30.0	333.4	14.9	63.0	20.1	1.8	0.4	5.1
2Bg	4.0	250.0	12.8	15.2	0.9	0.7	<0.1	0.1
PP Ah1	115.9	5083.3	36.2	53.1	36.6	4.9	5.7	19.3
Ah2	112.2	583.5	6.8	27.6	21.2	8.0	6.0	37.7
Bw	89.2	416.7	7.6	33.2	22.3	4.7	3.2	23.9
SB Ah	74.8	3083.3	51.1	107.2	19.3	1.4	2.4	8.2
AB	38.5	500.0	13.1	38.1	13.6	4.4	1.0	10.1
Bw	50.7	333.3	5.2	49.3	20.6	3.6	0.9	6.0
XB Ah	152.5	8416.6	58.6	97.4	27.3	5.1	6.5	18.7
AB	28.1	500.0	7.0	61.2	11.0	3.7	0.4	2.0
2Bw	8.1	333.0	13.8	38.0	4.4	0.8	<0.1	0.1
MO Ah1	16.2	1666.7	65.2	80.0	7.7	1.0	<0.1	0.6
Ah2	3.7	333.3	41.4	22.3	1.0	1.5	<0.1	0.1
SC Ah	81.1	1166.6	42.2	42.2	17.1	6.1	5.0	19.0
Bw	12.9	500.0	48.2	36.2	5.3	2.9	<0.1	1.7
XP Ah1	2.0	1125.8	562.9	84.1	<0.1	0.3	<0.1	<0.1
Ah2	4.1	303.3	73.9	85.2	2.9	0.6	<0.1	<0.1



Fraccionamiento de Al en disolución. *AlSA: soluble en ácido Al; AlNL: no lábil Al, AlL: lábil*

Variaciones en la composición de las aguas en la cuenca del Sor

Las aguas de los arroyos tienen concentraciones medias más bajas de SO_4^{2-}, NO_3^{-}, K^{+}, NH_4^{+}, Al, H^{+} y DOC que los respectivos pluviolavados y disoluciones del suelo. En contraste, el Ca^{2+} y, en menor medida el Mg^{2+}, presentan concentraciones más altas en las aguas de drenaje que en la disolución del suelo. Las concentraciones de Na, por el contrario, apenas varían desde el pluviolavado a los arroyos. El descenso de concentración de aniones y el aumento en cationes básicos como Ca^{2+} y Mg^{2+} en las aguas de los arroyos va acompañada no sólo de la neutralización de la acidez, que entra en las cuencas por deposición atmosférica, sino también de la producción de alcalinidad y la práctica ausencia de Al en las aguas superficiales.

Mientras que la deposición atmosférica parece contribuir a una acidificación acelerada de suelo, causando el lixiviado de cationes básicos, otros procesos como el enriquecimiento en Al del complejo de cambio y una relativa abundancia de Al en las disoluciones del suelo, junto a la acción de mecanismos de amortiguación como la retención de sulfato, el cambio de cationes y en alguna medida la alteración mineral deben jugar un papel en los suelos. Sin embargo, las grandes diferencias observadas entre la composición de la disolución de los suelos y la composición de las aguas de los arroyos sugiere que los procesos que contribuyen a la neutralización del aporte ácido y a mantener una relativa calidad de las aguas superficiales, también tienen lugar en el subsuelo.

Flujos de entrada-salida. Balance de elementos

Los balances entrada-salida de los diferentes iones se calcularon a partir del los datos de precipitación, pluviolavado y salidas de aguas por los arroyos. El reciclado interno de Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+ y Mn^{2+}, se estimó a partir de la relación de deposición de Na^+, asumiendo que no hay intercambio de este catión en las copas de los árboles y que la deposición atmosférica de los cationes básicos es similar para todos ellos. Las entradas por pluviolavado fueron mucho mayores que la deposición en campo abierto, en especial para K^+, Ca^{2+} y Mg^{2+} entre los cationes y para SO_4^{2-} y Cl^- entre los aniones. Sólo en las subcuencas de Foxo y Santar se producen claros aumentos en la acidez mientras que para NH_4^+ y NO_3^- únicamente se han encontrado pequeños aumentos o disminuciones dependiendo de la cuenca. Estas diferencias se deben en parte a la captación por las copas de los árboles de deposición seca y oculta, además del efecto del lixiviado de copa. La aparente toma de nitrógeno por la vegetación probablemente conduce a la subestimación de los flujos de N. El mismo problema puede ocurrir con los flujos de H^+ debido a una posible neutralización en las copas.

Los porcentajes de lixiviado de copa fueron similares en las diferentes subcuencas, algo mayores en las de Santar y Foxo a causa de la mayor superficie con cubierta forestal. Este proceso de intercambio en copa explica alrededor de un 65% de la deposición total de K^+, seguido del Ca^{2+} (32%), Mn^{2+} (20%) y sólo 15% para el Mg^{2+}.

Excepto en el caso de las subcuencas de Foxo y Santar, las aguas de los arroyos son circumneutrales, con muy poco Al y una alcalinidad varible, excepcionalmente alta en la subcuenca denominada 'Nacimiento', que influye en las aguas de todo el cauce principal. Esta anormalmente alta alcalinidad, coincidente con los mayores flujos de Ca^{2+}, se debe probablemente a un encalado incontrolado de las aguas del río en ese punto, pero no hay evidencias de que esto haya ocurrido en otros puntos de la cuenca. En cualquier caso, el inesperado encalado del curso principal del río ha contribuido a majorar la calidad de sus aguas. Para describir las relaciones entrada / salida se utiliza el parámetro 'Salida neta', definida como (salidas-entradas) x 100/salidas. Valores negativos indican que la cuenca actúa como sumidero mientras que los positivos indican exportación.

Tabla VI. Salida neta de los principales iones y de alcalinidad en la cuenca del Sor y en tres subcuencas.

CUENCA	SO_4^{2-}	NO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	H^+	Al^{3+}	Mn	Zn	HCO_3^-
Sanche	-27	-57	491	101	15	-44	-100	-61	-85	-73	106.0
Foxo	-60	0	328	92	26	-46	-100	-62	-91	-77	73.0
Santar	-33	-48	125	64	28	-19	-93	12	-66	-66	12.0
Sor	-43	-27	578	88	17	-5	-100	-67	-95	-69	144.0

Del análisis de estos balances se deduce que los principales mecanismos que contribuyen a la neutralización de la acidez en la cuenca y al mantenimiento de una buena calidad de las aguas superficiales son la retención de sulfato, la alteración mineral y, en menor medida, el intercambio de cationes, cuya importancia ha de ser considerablemente inferior debido a que el complejo de cambio de los suelos está fuertemente empobrecido en cationes básicos. Otro aspecto interesante es que, frente a la esperada transferencia de Al hacia las aguas superficiales, ésta se ve fuertemente limitada ya en los horizontes de los suelos como se ha visto con la fuerte disminución de la concentración de Al en disolución con la profundidad.

Azufre en los suelos y retención de sulfato

Los principales procesos implicados en la retención o movilización de S en los suelos bien drenados de áreas forestales son: i) asimilación del SO_4^{2-} depositado por la vegetación y los microorganismos, que es contrarrestado por la hidrólisis y la mineralización de S orgánico y, ii) la adsorción y, ocasionalmente, la precipitación de minerales SO_4-Al, siendo la desorción el proceso contrario que devuelve el sulfato a las disoluciones. Aunque la inmovilización de S en la materia orgánica y las plantas es un proceso significativo, generalmente se considera que la retención por componentes inorgánicos es el proceso de mayor importancia en la determinación de la movilidad del S, especialmente en sistemas sometidos a altos niveles de deposición. El proceso tiene gran importancia en los efectos de la deposición ácida sobre las aguas superficiales, ya que la presencia de un ion móvil como el sulfato puede causar un aumento de la transferencia de H y Al.

Para el estudio del azufre en los suelos se analizó, en primer lugar su contenido en S total, y se realizó el fraccionamiento del SO_4^{2-} nativo en soluble en agua y adsorbido. Para el estudio de la capacidad de retención de los suelos se realizaron isotermas de adsorción utilizando disoluciones con concentraciones de SO_4^{2-} hasta 200 mg L^{-1}; en el rango de las encontradas en la lluvia (1.5-22.0 mg L^{-1}) y bajo las copas de los árboles (2-193 mg L^{-1}). El contenido en S total de los suelos varió entre 0.7 to 1.9 g kg^{-1}, con los valores más altos en los horizontes superficiales y claramente relacionados con el contenido en materia orgánica (r=0.99). Las bajas relaciones C/S (<60) y N/S (<4) son indicativas de un enriquecimiento anormal en S de estos suelos y sugiere un alto potencial de mineralización de S orgánico. El azufre orgánico representa más del 90% del S total, mientras que el azufre inorgánico nativo (retenido + soluble en agua) varia entre 0.025 y 0.4 g kg^{-1}. El SO_4^{2-} soluble en agua fué siempre más abundante que el adsorbido en los horizontes superficiales, mientras que lo contario es cierto para los subsuperficiales. Las cantidades más importantes de SO_4^{2-} retenido se encontraron en los horizontes Bw de los suelos de bosque caducifolio, los horizontes más ricos en Al no cristalino y Fe cristalino.

En cuanto a la capacidad de retención de sulfato, en todos los horizontes superficiales se produce desorción, independientemente de la concentración de equilibrio utilizada, mientras que en los restantes horizontes no hay retención hasta concentraciones de equilibrio entre 10-40 mg of $SO_4^{2-} L^{-1}$, llegándose a alcanzar valores máximos de retención entre 46 and 451 mg SO_4^{2-} por kilogramo de suelo. La capacidad total de retención de sulfato de los suelos (SO_4^{-2} nativo retenido + capacidad máxima de retención) se relaciona significativamente con el Al extraíble con pirofosfato (r=0.83) o con el Al extraíble en pirofosfato y el Fe libre total (r=0.75).

Los resultados muestran que los horizontes superficiales están saturados en sulfato y han perdido su capacidad de retener nuevos aportes, pero los horizontes subsuperficiales todavía exhiben una cierta capacidad de almacenar este anión. La semejanza entre el sulfato desorbido experimentalmente y la fracción soluble medida en agua sugieren que la retención de sulfato no es totalmente reversible, una idea ampliamente establecida en estudios de campo. En todo caso, el efecto positivo de la retención es, en alguna medida, limitado por la mineralización a largo plazo del S orgánico y la posible desorción del SO_4^{2-} adsorbido.

Determinación de cargas críticas. El modelo MAGIC.

A partir de los datos obtenidos en la cuenca del Sor se han calculado las cargas críticas para el sulfato aplicando el modelo dinámico: MAGIC (Model of Acidification of Groundwaters In Catchments) a tres subcuencas de la cuenca alta del río Sor, para evaluar el grado de acidificación histórico, presente y futuro, en la zona. Los objetivos específicos de la aplicación de este modelo dinámico fueron:

1)Evaluar la utilidad de este tipo de modelos en la predicción de los efectos de la deposición ácida en una cuenca con condiciones climáticas diferentes a las de los lugares en que se han desarrollado y utilizado.

2)Determinar los nivel de deposición ácida requerida para alcanzar la recuperación a un nivel predeterminado (carga crítica).

La deposición histórica desde 1850 fue estimada ajustando la deposición actualmente observada, y las emisiones de la Central Térmica, a una reconstrucción para Europa de las emisiones de azufre, usando los modelos DAIQUIRI y DEPUT.

Escenarios de deposición y absorción de nutrientes

Las situaciones históricas y futuras de la deposición en Europa se basaron en los estudios realizados en el 'International Institute for Applied Systems Analysis' (IIASA) y el modelo RAINS. Utilizando los datos de las emisiones modeladas por RAINS como entradas para el modelo DAIQUIRI se obtuvieron estimaciones de la deposición total de todos los iones en la cuenca del Sor (en base a la cuadrícula EMEP). La deposición en las zonas de estudio se estimó con el modelo DEPUT y se ajustó a la deposición medida. Para la estimación de la toma de cationes básicos por la biomasa se usó el modelo DEPUT, que se basa en la densidad de biomasa y en datos de composición elemental. Como situaciones futuras ('escenarios') se utilizan cuatro de las estrategias de reducción de las emisiones de SO_2 y NO_x previstas en el 'Borrador de la Comunicación al Consejo y al Parlamento sobre una Estrategia Comunitaria para Combatir la Acidificación (COM(97)88/4)' de la DG IX de la UE:

1. **CRP**. Plan Actual de Reducción. Segundo Protocolo UN-ECE del Azufre (UN-ECE, 1995) basado en los topes de emisión oficialmente admitidos por los estados para el año 2010.
2. **REF**. Situación de referencia. Adoptando el escenario mas exigente del Plan Actual de Reducción (CRP) y la Legislación actual para el año 2010.
3. **B1**. Es uno de los 6 escenarios (B1-B6) que pretenden alcanzar una reducción del 50% para aquellas áreas no protegidas por el escenario CRP en el año 2010.
4. **MFR**. Máxima Reducción Técnicamente Posible. Considera restricciones impuestas por la legislación actual y los ritmos históricos de reciclado de la reserva de capital para determinar la aplicación potencial de las opciones actualmente disponibles de control de emisiones.

Para evaluar las respuestas probables en la química de los suelos y las aguas superficiales a los cambios en la deposición acidificante se realizó un pronóstico que se proyecta 56 años en el futuro (desde el año 1994 al año 2050). El modelo MAGIC fue calibrado para simular el estado actual de los suelos y las aguas superficiales en las tres subcuencas consideradas. En Sanche y Foxo la simulación histórica sugiere que ha habido poca acidificación. En Santar, sin embargo, el modelo indica que ha habido una caída de una unidad de pH durante el período histórico considerado. MAGIC establece una pérdida del 40% de la reserva de bases cambiables durante el período histórico en los tres sitios.

Tabla VII. Valores actuales (1993) observados (Obs) y simulados por MAGIC (Sim) del pH y la CNA del agua de los arroyos y la saturación en bases del suelo (SB, en % de la CIC).

	Santar	Santar	Sanche	Sanche	Foxo	Foxo
	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim
pH arroyos	5.3	4.8	6.7	6.5	6.1	6.4
CNA arroyos	-10	-12	45	53	38	44
SB suelo	16.4	16.1	17.5	17.6	15.7	15.6

Respuestas de suelos y aguas superficiales ante los reducciones en la deposición

El modelado de la respuesta de las aguas superficiales de los tres sitios ante las reducciones de la deposición ácida consiste en un continuo deterioro en el pH y en la capacidad de neutralización de ácidos (CNA) bajo las condiciones definidas para los tres escenarios. En la subcuenca de Santar sólo se inicia una recuperación sostenida bajo las condiciones más exigentes de reducción de la deposición. En las subcuencas de Sanche y Foxo sólo se predice un deterioro continuado, no observándose recuperación ni tan siquiera en las condiciones del escenario MFR. En los suelos se pronostica un descenso continuado en la reserva de cationes básicos. Únicamente en el escenario MFR se estabiliza este deterioro de la reserva de cationes básicos en las tres subcuencas, si bien MAGIC no predice recuperación a largo plazo.

Determinación de la carga crítica

La variable de calidad del agua considerada, en este caso su CNA, se compara con el objetivo ambiental que se pretende alcanzar en el futuro (CNA_{lim}). La CNA_{lim} es la CNA crítica necesaria para proteger un objetivo biológico en el ecosistema. En este caso se han tomado como referencia dos valores:
i) CNA_{lim} = 0 µmol L^{-1}. Es el valor adoptado por el 'Critical Loads Programme' del Reino Unido (CLAG, 1995). Define una probabilidad de supervivencia de la trucha del 50%. ii) CNA_{lim} = 20 µmol L^{-1}. La elección de este segundo valor se hizo con la finalidad de obtener un estimación más conservadora de la carga crítica.

En la subcuenca de Santar la carga crítica es 0, esto supone que, aún suprimiendo todo el componente antrópico de la deposición en el primer año de la predicción, la CNA de las aguas superficiales no alcanzaría una CNA_{lim} = 0 en el año 2050. En Sanche y Foxo la deposición actual de sulfato excede la carga crítica para aguas superficiales a pesar de las condiciones más favorables que estas presentan. Como principales resultados de la aplicación del modelo, destaca el hecho de que las respuestas a una reducción en la deposición, durante los 56 años del período de pronóstico, son similares a grandes rasgos, con un continuo deterioro de la calidad del agua y del suelo bajo todos los escenarios considerados, con la excepción del mas restrictivo (MFR), en el que la deposición antrópica de azufre alcanza valores cercanos a los niveles de fondo, debidos fundamentalmente a aportaciones de sales de origen marino. La aparente falta de recuperación bajo condiciones de una reducción de la carga ácida se explica también por las grandes cantidades de sulfato retenidas por el sistema suelo a lo largo del período histórico. Dado que en MAGIC todo el sulfato del suelo se considera enlazado de forma reversible, su liberación continuará teniendo un efecto negativo sobre la calidad de los suelos y las aguas superficiales en futuras situaciones de reducción de la deposición. Es en este punto donde se sitúa la mayor incertidumbre en la aplicación del modelo ya que existen evidencias de que algún azufre puede ser irreversiblemente retenido por los suelos. De ser así, este sulfato no será lixiviado (o lo será a largo plazo) a las aguas superficiales y por tanto, en condiciones de reducción de la deposición, disminuirá la pérdida de cationes básicos y se reforzará la recuperación. La recuperación, sin embargo, no puede tener lugar mientras el suelo siga liberando sulfato a ritmos que excedan los aportes de cationes básicos por meteorización y deposición.

Conclusiones

El estudio de los flujos de deposición y de salida de elementos de la cuenca alta del río Sor, de las características de los suelos y de su disolución, ha permitido conocer los principales efectos de la deposición atmosférica en suelos y aguas superficiales, proporcionando información acerca de los principales mecanismos de neutralización de los aportes ácidos. Además se ha realizado un primer análisis retrospectivo de los cambios ocurridos en suelos y aguas y una proyección al futuro de los cambios que cabría esperar, ante algunos de los escenarios de reducción de las emisiones de óxidos de S y N. Mientras que la deposición atmosférica parece contribuir al estrés de las vegetación y a una acidificación acelerada del suelo, que causa el lixiviado de cationes básicos, un enriquecimiento en Al del complejo de intercambio y una relativa abundancia de Al en la disolución, con predominio de las formas de Al lábil, algunos procesos de amortiguación como la retención de sulfato por la fase sólida, el cambio de cationes y la alteración mineral, estos últimos en menor medida dada la escasez de minerales alterables y la pobreza en cationes básicos del complejo de cambio de los suelos, parecen jugar un papel importante en la atenuación de los efectos de la carga ácida.

La retención de sulfato limita la pérdida de cationes básicos y la transferencia de acidez, Al y metales a las aguas superficiales. El efecto positivo de este proceso es, en alguna medida, dependiente de la mineralización a largo plazo de las elevadas reservas de S orgánico y de la posible desorción del sulfato adsorbido. El conocimiento de la importancia y de los ritmos de desorción de sulfato constituye un aspecto de interés primordial para la predicción de los efectos de las estrategias de reducción de las emisiones de contaminantes de origen antrópico, en especial en áreas de clima templado-húmedo ya que, con frecuencia, los suelos de estas regiones poseen altas reservas de sulfato retenido y alta capacidad de retención de este anión. Estas amplias reservas de sulfato pueden ser desorbidas bajo condiciones de reducción de los aportes de este anión, con lo que la pérdida de cationes básicos y la acidificación de las aguas superficiales puede continuar. La situación cambia si la retención de sulfato no es totalmente reversible, o si las tasas de desorción son lo bastante lentas para ser compensadas por la alteración mineral o por los aportes externos de cationes básicos a través de la precipitación.

Las predicciones hasta el año 2050 realizadas con el del modelo MAGIC tomando como referencia 'escenarios' en los que se prevén reducciones en la deposición de sulfato desde el 3% hasta el 78%, se pronostica un descenso continuado en la reserva de cationes básicos de los suelos y un continuo deterioro del pH y de la capacidad de neutralización de ácidos en las aguas superficiales. El escenario más exigente pronostica una estabilización en el deterioro, pero no recuperación, de la reserva de cationes básicos, mientras que para las aguas superficiales sólo se espera recuperación en una de ellas. Dado que MAGIC considera totalmente reversible la retención de sulfato, su liberación a las aguas en condiciones de disminución de los aportes es la causa principal de la ausencia de recuperación por lo que sus predicciones han de tomarse como un ejemplo del 'peor de los casos'.

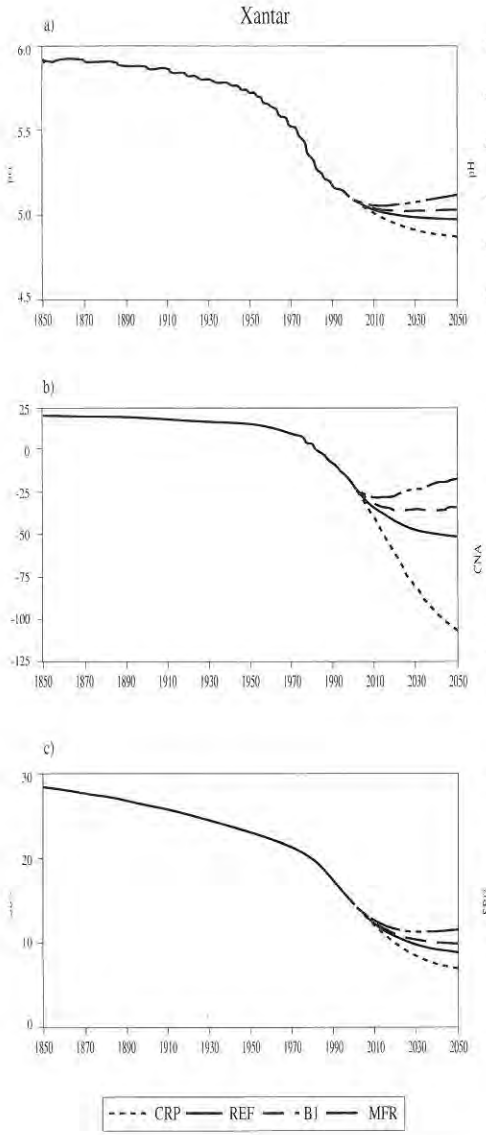


Fig. XII.2. Resultados de la simulación con MAGIC de los valores de a) pH, b) CNA ($\mu eq\ L^{-1}$) y c) saturación en bases del suelo (% de la CIC), en la cuenca de Xantar entre los años 1850-2050.

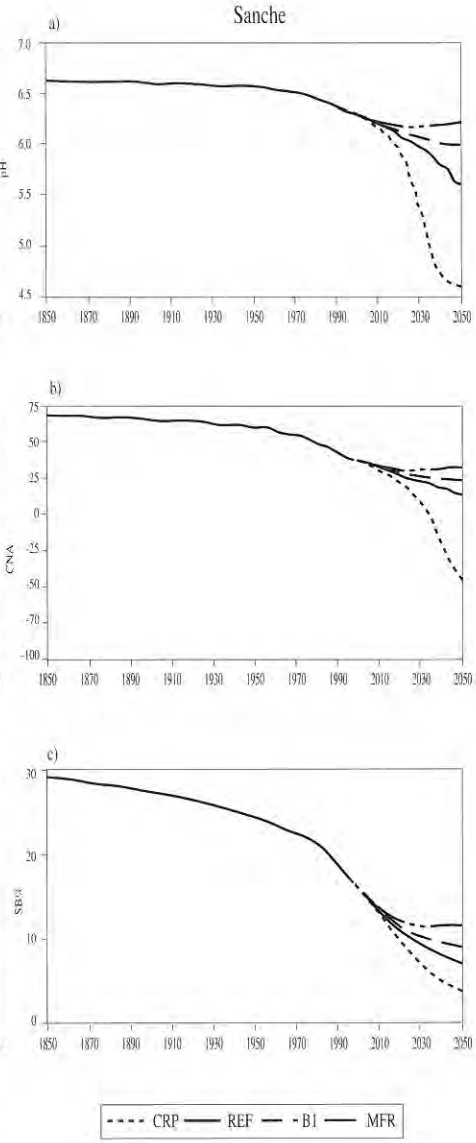


Fig. XII.3. Resultados de la simulación con MAGIC de los valores de a) pH, b) CNA ($\mu eq\ L^{-1}$) y c) saturación en bases del suelo (% de la CIC), en la cuenca de Sanche entre los años 1850-2050.

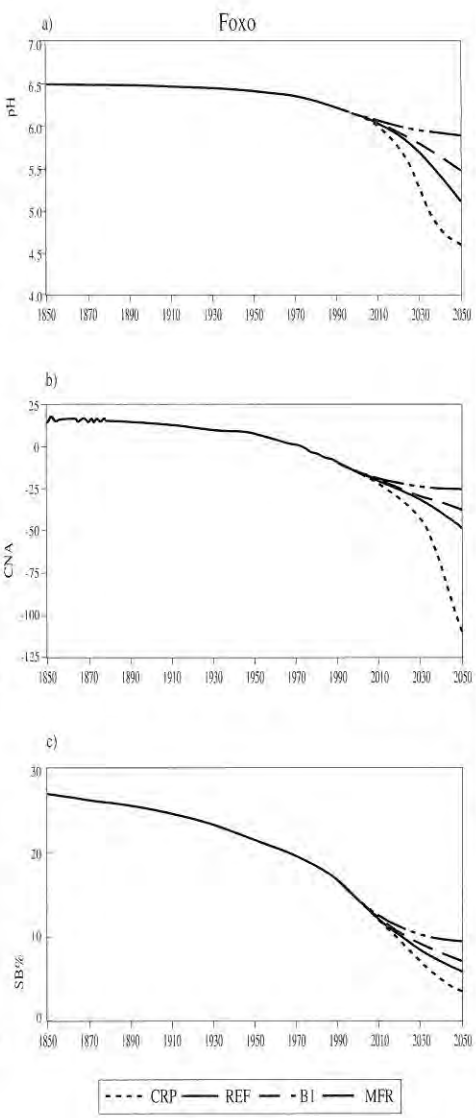


Fig. XII.4. Resultados de la simulación con MAGIC de los valores de a) pH, b) CNA ($\mu eq\ L^{-1}$) y c) saturación en bases del suelo (% de la CIC), en la cuenca de Foxo entre los años 1850-2050.

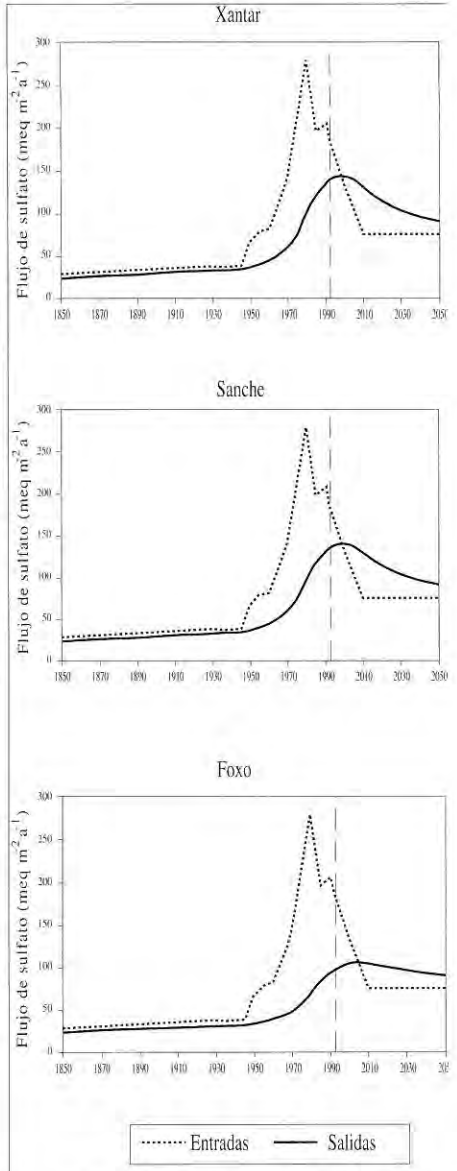


Fig. XII.5. Flujos simulados de entradas (DEPUT) y salidas (MAGIC) en Xantar, Sanche y Foxo durante el período1850-2050.

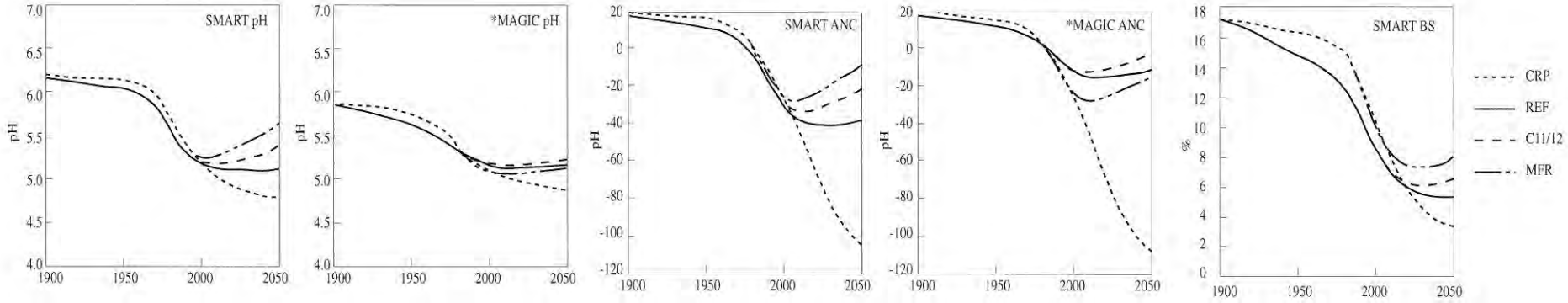


*Fig.XII.10: Simulación de pH y ANC (μeq L^{-1}) en las aguas superficiales y la saturación en bases (%) del suelo en Xantar según los modelos *MAGIC y SMART con los escenarios CRP, REF, C11/12 y MFR*

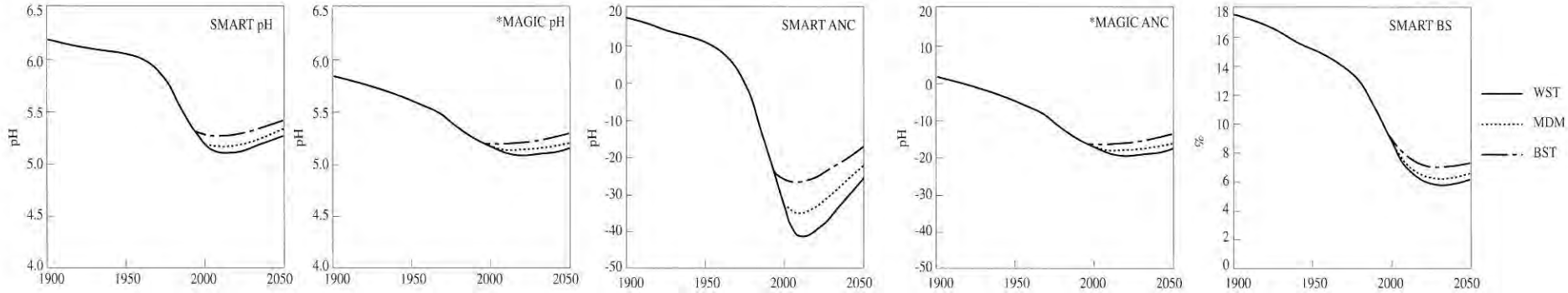


Fig.XII.11: Simulación de pH y ANC (μeq L^{-1}) en las aguas superficiales y la saturación en bases (%) del suelo en Xantar según los modelos MAGIC y SMART con los escenarios BST, WST y MDM.

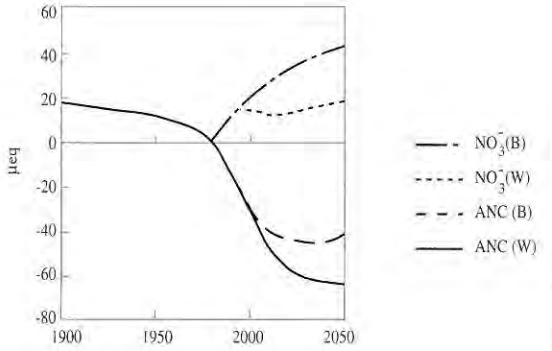
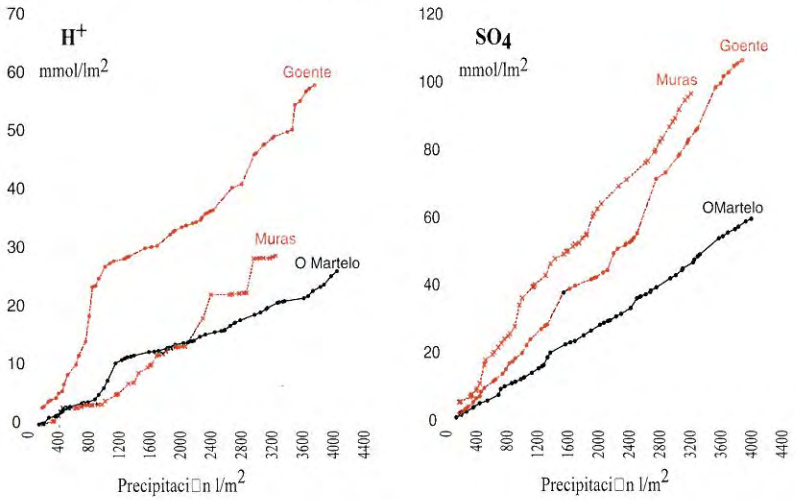


Fig. XII.12: Simulación de ANC y NO_3^- en las aguas superficiales de Xantar según el modelo MAGIC-WAND.

ESTUDIO INTEGRADO DE SISTEMAS FORESTALES AFECTADOS POR LLUVIAS ÁCIDAS

M.J. Gómez Rey y R. Calvo de Anta

PRECIPITACIÓN



Aportes absolutos de H^+ y SO^4 por precipitación en el periodo 1997+1998 (mg/m^2)
(O Martelo: parcela de referencia)

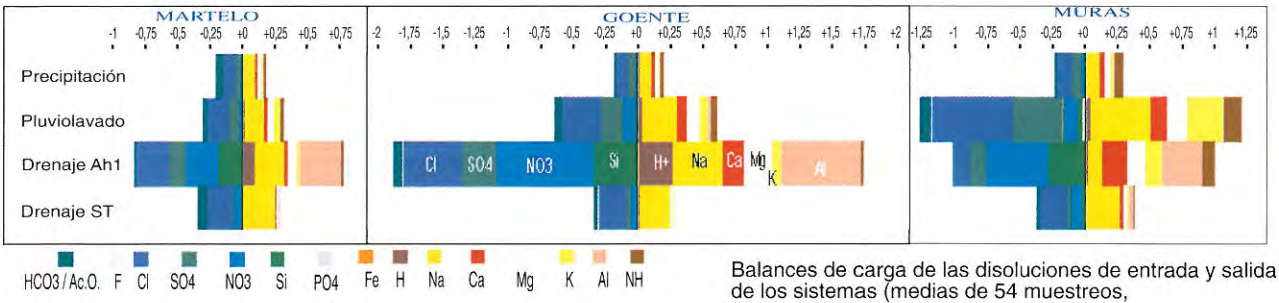
Precipitación

	O Martelo	Goente	Muras
1997	-1.11	15.06	43.98
1998	-16.38	22.91	130.11

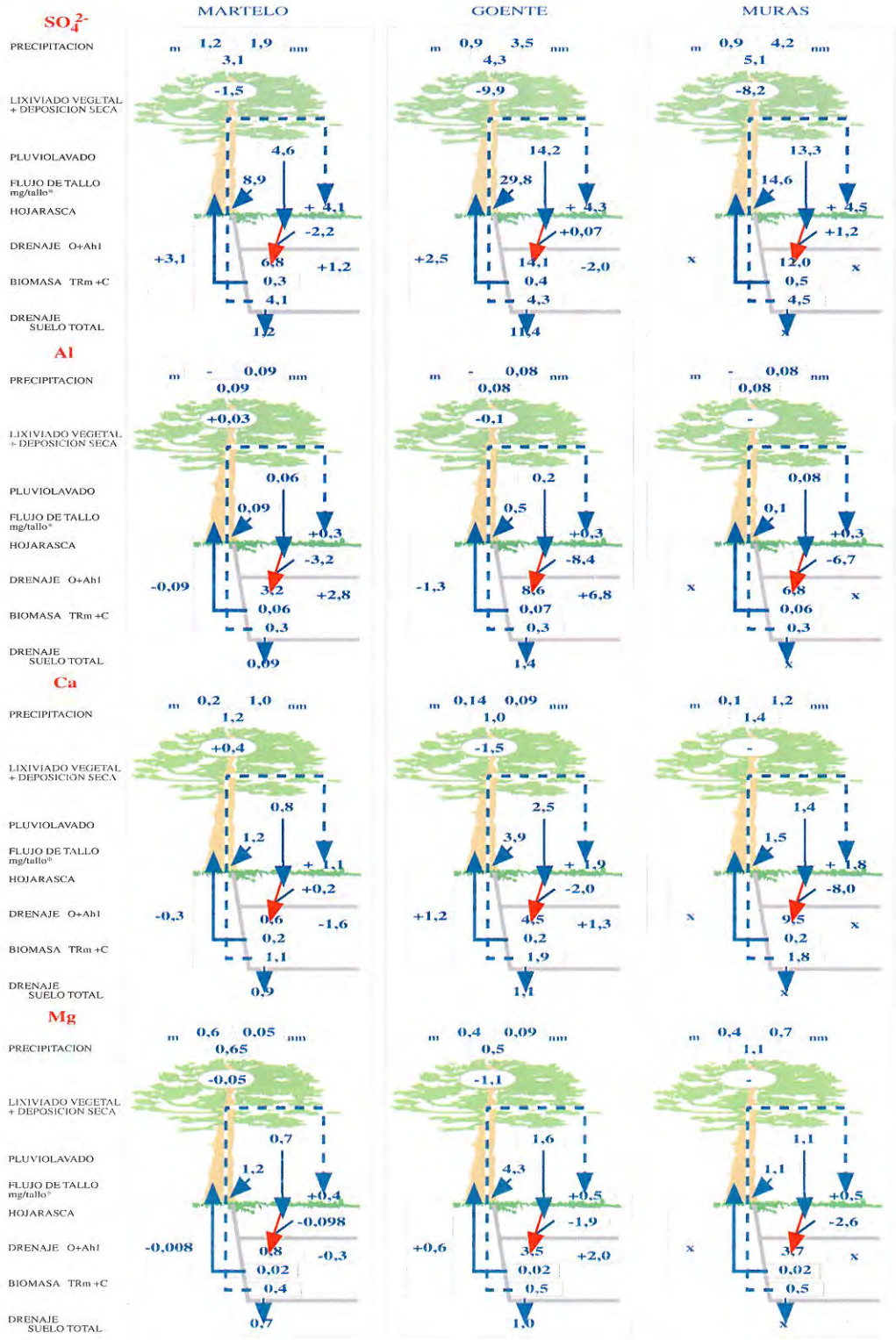
Pluviolavado

	O Martelo	Goente	Muras
1997	-11.74	177.59	167.34
1998	26.58	43.80	96.33

Potencial acidificante de las disoluciones de entrada a los sistemas (mol_c/m^2/año) Ac(pot) DEP = SO4+NO3+NH4+Cl+F-(Na+Ca+Mg+K+Al+Fe)



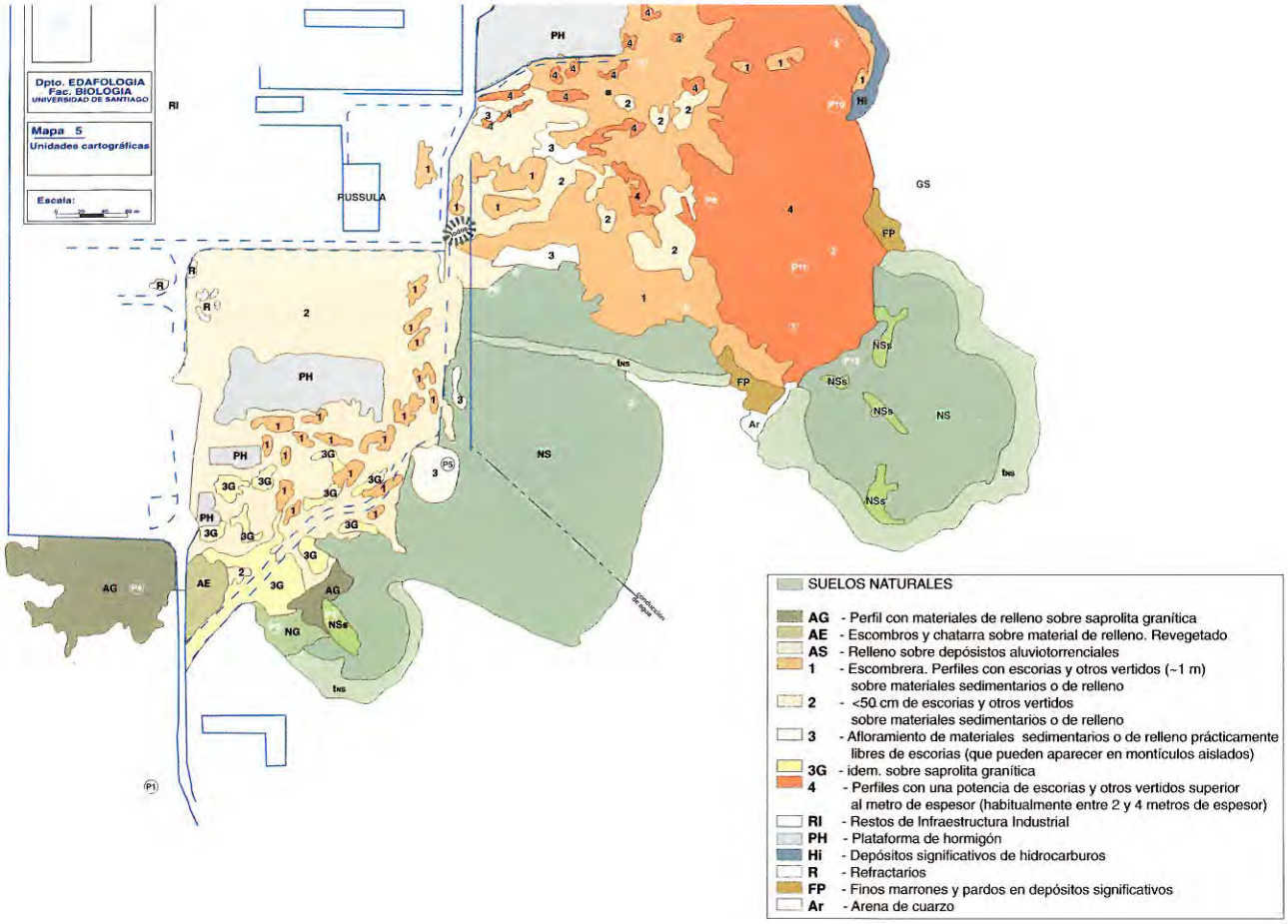
Balances de carga de las disoluciones de entrada y salida de los sistemas (medias de 54 muestreos, 1997+1998)($mmol_c/l$)



Síntesis del Balance de SO_4, Al, Ca y Mg en 1997 (gr/m^2/año)

CONTAMINACION DE SUELOS Y AGUAS Y CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES DE ESCOMBRERA DE LA ANTIGUA SIDERURGICA DE TEIXEIRO (LA CORUÑA)

R. Calvo de Anta, F. Macías Vázquez (1997)



Contenidos medios de metales pesados en los principales tipos de materiales de la escombrera.

Mat.	Fe	Mn	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Cd	Hg
	%	%	.....	.....	ppm	.....	.....		
E	32.7	3.5	67	994	108	2857	312	5.4	0.044
PA	51.1	1.4	138	20905	14030	818	1445	270	1.506
FB	<0.1	<0.1	25	414	39	23	25	2.1	0.016
M	34.1	1.8	398	342	73	640	449	3.1	0.020

Intervalos de variación en el contenido de metales pesados de los principales tipos de materiales presentes en la escombrera.

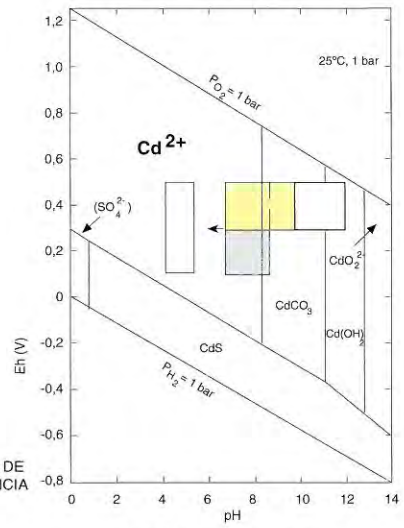
	Escorias(E)	**P. de acería(PA)**	**Finos blancos(FB)**	**Metálicos(M)**
Fe%	14-64	13-80	0-0.2	8-90
Mn%	0.9-8.1	0.4-2.8	0-0.2	0-7.0
Ni (mg/kg)	30-155	11-293	5-75	10-1150
Zn	150-2665	190-54500	25-1235	16-895
Pb	49-345	18-29150	3-105	13-230
Cr	550-11000	285-1230	3-50	40-2400
Cu	116-530	97-1700	7-45	60-1000
Cd	1.5-15	4.5-900	0.5-4.5	0.5-6.5
Hg	0.007-0.160	0.007-3.020	0.001-0.057	0.001-0.033

ESTABILIDAD DE DISTINTAS ESPECIES DE Cd, Hg , Cu, Zn y Pb
SIDEGASA (Teixeiro, La Coruña)

Especies de metales pesados dominantes en cada sistema geoquímico de la escombrera y tendencia de evolución cuando las condiciones se acercan a las de los suelos de Galicia.

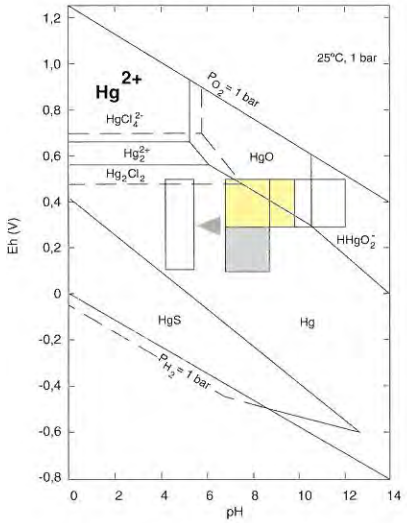
	Especie dominante			
	S. abierto	S.saturado	S.reductor	S.natural
Cr	CrO4=	Cr2O3	Cr2O3	Cr2O3
Cu	CuO	CuO	CuO/Cu2O	Cu+2
Zn	ZnO/ZnCO3	ZnO	ZnO/ZnCO3	Zn+2
Cd	CdCO3/Cd+2	CdCO3	CdCO3/Cd+2	Cd+2
Pb	PbCO3	PbCO3	PbCO3	PbCO3
Ni	Ni(OH)2/Ni+2	Ni(OH)2	Ni(OH)2/Ni+2	Ni+2
Hg	HgO/Hg	HgO/HgO2-	Hg	Hg
Fe	Fe(OH)3	Fe(OH)3	Fe(OH)3/Fe+2	Fe+2
Mn	MnO/Mn+2	MnO/MnO2	Mn+2	Mn+2

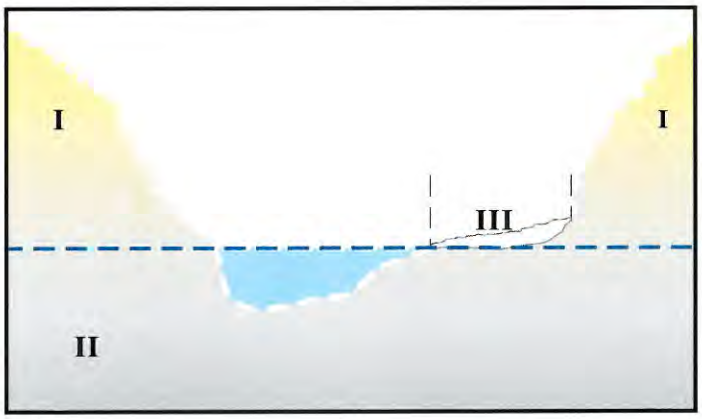
SISTEMA Cd-C-S-O-H



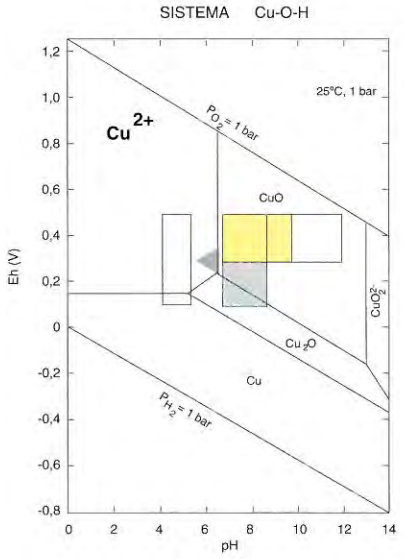
ABIERTOS
SATURADOS
REDUCTORES
EVOLUCION HACIA CONDICIONES DE LOS SUELOS NATURALES DE GALICIA

SISTEMA Hg -O-H-S-C





SISTEMA Cu-O-H



	Eh(vol)	pH	Formas más estables Zn 7000 ppm	Cd 80 ppm	Pb 4000 ppm
I	OXIDANTE 0.3-0.5	BASICO 7.0-9.0	ZnO $ZnCO_3$	$(Cd,Ca)CO_3$ Cd^{2+}	$PbCO_3$
II	REDUCTOR 0.1-0.3	BASICO 7.0-8.5	ZnO $ZnCO_3$	$(Cd,Ca)CO_3$ Cd^{2+}	$PbCO_3$
III	OXIDANTE 0.3-0.5	HIPERBASICO 9.0-11.0	ZnO $ZnCO_3$	$(Cd,Ca)CO_3$	$PbCO_3$

BIBLIOGRAFIA

Alvarez Rodriguez, E. y Calvo de Anta, R. (1992).- Aplicación de un método de fraccionamiento de especies alumínicas a soluciones de suelos de Galicia. *Suelo y Planta*, 2, 215-230.

Alvarez Rodriguez, E., Martinez Cortizas, A. y Calvo de Anta, R. (1992).- Geochemical aspects of aluminium in forest soils in Galicia (NW Spain). *Biogeochemistry*, 16, 167-180.

Alvarez Rodriguez, E., Pérez Otero, A. y Calvo de Anta, R. (1993). Aluminium speciation in surface waters and soil solution in areas of sulphide mineralization in Galicia (NW Spain). *The Science of the Total Environmen*t, 133, 17-37.

Alvarez, E., García-Rodeja, E. (1998) Speciation and solubility control of Al in soils developed from slates of the river Sor watershed (Galicia, NW Spain). *Water, Air and Soil Pollution*. 103. 35-53.

Barreal, M.E., M. Camps Arbestain, F. Macías (2001). Phosphate and sulfate retention by nonvolcanic soils with andic properties. *Soil Sci.* (en prensa).

Berg, B., Berg, M., Bottner, P., Box, E., Breymeyer, A., Calvo de Anta,R., Couteaux, M., Gallardo, A., Escudero, A., Kratz, W., Madeira, M., Meentemeyer, V., Muñoz, F., Piussi, P., Remacle, J and Virzo de Santo, A. (1993).-Litter Mass Loss in Pine Forests of Europe: Relationships with Climate and Litter Quality. *Biogeochemistry* , 20, 127-159.

Buurman, P., Doesburg, J.D. van., Fernández Marcos, M.L. (1994). Changes in thermal properties of podzol-B organic matter with profile development. En: SENESI, N. and MIANO, T.M., Eds. "*Humic substances in the global environmment and implications on human health*", pp. 541-548.

Calvo de Anta, R., García-Rodeja, E. y Macías Vázquez, F. (1983).- Mineralogical variability in weathering microsystems of a granitic outcrop of Galicia (Spain). *Catena, 10, 225-236.*

Calvo de Anta, R. y Alvarez Rodriguez, E.(1987).- Problemas de caracterizacion del complejo de cambio en suelos de Galicia. *Anales de Edafología y Agrobiología,* 46, 433-448.

Calvo de Anta, R., Macías Vázquez, F. y Buurman, P. (1987). Procesos de alteración y neoformación mineral en suelos serpentínicos de Galicia. *Cuad. Lab. Xeol. de Laxe,* 11: 161-170. A

Calvo de Anta, R. (1992). El Eucalipto en Galicia. Sus relaciones con el medio natural. Servicio de *Publ. Universidad de Santiago*, 211 pp.

Calvo de Anta, R. y Alvarez Rodriguez, E. (1992).- Aluminium activity in soil solution and mineral stability in soils in Galicia (NW Spain). *Clay Minerals,* 27, 325-330.

Calvo de Anta, R.,Macías, F. y Riveiro Cruz, A. (1992). Aptitud Agronómica de los suelos de la provincia de La Coruña (Mapas 1:200.000 y Leyenda). *Excma. Dip. Provincial de La Coruña,* 88 pp y 5 mapas.

Calvo de Anta, R., y Macías, F. (1993).- Influence of geological material in the composition of surface waters of Galicia (NW Spain). Genesis of clay minerals. *Clay Minerals*, 28, 285-296.

Calvo de Anta, R. y Macías, F. (1993). Rôle des processus pédogénetiques dans le maintien de la qualité des eaux superficielles en zones tempérées humides. Exemple des sols acides sur roches granitiques et schisteuses de la Galice (NW-Espagne). *C. R. Acad. Sci. Paris, t.* 316, 799-805 Calvo de Anta,R. Guitián Rivera, F., y Macías Vazquez, F (1981).- Aspectos geoquímicos de la alteración de un granito de dos micas en Galicia. *Acta Científica, 18, 287-313.*

Calvo de Anta, R. y Pérez Otero, A. (1994).- Soils affected by acid mine waters in Galicia (N.W. Spain). *Water, Air and Soil Pollution*, 73, 247-263.

Calvo de Anta, R., Vidal-Torrado, P., Fernandez Ondoño, E., Macías Vazquez, F., González Suarez C., y Touza Rodriguez, R.(1999). Wheathering and pedogenesis on serpentinized rocks under mediterranean, humid temperate and humid tropical climates. *6th International Meeting on soils with mediterranean type of climate.* Barcelona. 1999.

Calvo de Anta, R. y Macías, F. (2001). Mapa de Solos de Galicia (1:50.000). HOJA 8 , VIVEIRO. *Xunta de Galicia*

Camps Arbestain, M. et al. 1999. Parent Material on Sulphate Sorption in Forest Soils from Northwestern Spain. *Soil Sci. Soc. Am. J.* , 63: 1906-1914.

Camps Arbestain, M., F. Macías. (2000). Respuesta a la acidificación y adsorción de sulfatos en suelos ándicos y ferrálicos desarrollados a partir de anfibolitas en Galicia (NW Spain). *Edafología*, 7:61-71.

Camps Arbestain, M., M.E. Barreal, F. Macías. (1999a). Relating sulfate sorption in forest soils to lithological classes, as defined to calculate Critical Loads of Acidity. *Sci. Total Environ.* 241:181-195.

Camps Arbestain, M., M.E. Barreal, F. Macías (1999b). Parent material influence on sulfate sorption in forest soils from Northwestern Spain. *Soil Sci. Soc. Am.* J. 63:1906-1914.

Camps Arbestain, M., M.E. Barreal, F. Macías. (1999c). Retención de sulfatos en suelos de Galicia: I. Ajuste de las isotermas de adsorción de sulfatos a las ecuaciones de Langmuir y Freundlich. *Edafología*, 6:1-16.

Camps Arbestain, M., M.E. Barreal, F. Macías (2001). Sulfate sorption in nonvolcanic Andisols and Andic soils from Galicia (NW Spain). *Geoderma* (en prensa).

Chesworth, W y Macías, F. (1984). pe, pH and podsolization. *Am. Jour. Sci., 285:* 128-146. A

Chesworth, W.; García-Rodeja Gayoso, E.; Martínez Cortizas, A.& Macías. F. (1998). Trace elements in podzols from Northern Spain. Proc. of the 16 World Congress of Soil Science, 20-26/08/1998, Montpellier (France). ISSS-AISS-IBC-SICS-AFES. En CD-ROM (CIRAD).

García Paz, C., Silva, B.M., García-Rodeja, E ., y Macías (1986). Propiedades de los suelos desarrollados sobre las anfibolitas de "Santiago-Ponte Ulla". *An. de Edaf. y Agrobio*l, XLV(9-10): 1271-1298

García Paz, C., Silva, B.M., García-Rodeja, E ., y Macías (1986). Meteorización de las anfibolitas del macizo "Santiago-Ponte Ulla" *An. de Edaf. y Agrobio*l, XLV, 1271-1298.

Fernández Marcos, M.L, Macías, F., y Guitián , F. (1979). A contribution to the study of the stability of clay minerals from the soil solution composition at different pF values. *Clay Minerals,* 14: 29-37. A

Fernández Marcos, M.L. y Macías, F. (1987). Análisis de los procesos de alteración y neoformación de sistemas edáficos a partir de consideraciones termodinámicas de equilibrios solución-mineral. *An. Edaf. Agrobiol., 46:* 1-25. A

Fernández Marcos, M.L. y Macías, F. (1989). Neoformación de minerales de la arcilla en la Espa a Peninsular: Tendencias termodinámicas basadas en la composición de las aguas de los ríos españoles. *Cuad. Lab. Xeol. de Laxe 14:* 19-28. 1. A

Fernández Marcos, M.L., Fuentes Colmeiro, R., López Mosquera, M.E. (1994). Los suelos de Galicia: problemas de fertilidad y corrección. *Agricultura* 742: 388- 391.

Fernández Sanjurjo, M.J.; Fernández Vega, V. y García-Rodeja Gayoso, E. (1997). Atmospheric deposition and ionic concentration in soils under pine and deciduous forests in the river Sor catchment. *The Science of the Total Environment*, 204, 125-134.

Fernández Marcos, M.L. Buurman, P. y Meijer, E.L. (1998). Role of Organic Matter and Sesquioxides on Variable Charge of three Soils from Galicia, Spain. Commun. *Soil Sci. Plant Anal.*29: 2441- 2457.

Fernández Sanjurjo, M.J.; Álvarez, E.; Fernández Vega, V. & García-Rodeja Gayoso, E. (1998). Chemistry of soil solutions under different kinds of vegetation in the vicinity of a thermal power station.*Environmental Pollution* 101 (1), 131-142. 1998.

Gago Rodriguez, C., Alvarez Rodriguez, E., Fernández Marcos, M.L. (1997). Estudio de la contaminación por flúor en las inmediaciones del complejo Alúmina- Aluminio de San Ciprián (Lugo). *Edafología* 3: 317-329.

Gago, C., Alvarez, E, Fernández Marcos, M.L. (2001). Comparison of methods for fluoride extraction from forest and cropped soils in the vicinity of an aluminium smelter in Galicia (NW Spain). Commun. *Soil Sci. Plant Anal.* 32 (en prensa).

García-Rodeja, E.(1985). Sobre la clasificación de los Andosoles y su existencia en materiales no volcánicos de Galicia (N.O. de España). *An. de Edaf. y Agrobiol.*, XLIV(11-12): 1651-1661. 1985.

García-Rodeja, E., Silva, B., Macías, F. (1987). Andosols developed from non-volcanic materials in Galicia, NW Spain. *Journal of Soil Science, 38.* 573-591. A

García-Rodeja E., F. Macías (1986). Materiales de bajo grado de orden (imogolita y geles alumínicos) en alteraciones de suelos podsólicos derivados de rocas graníticas de Galicia. Cuad. Lab. Xeol. de Laxe, 10, 191-208.

García-Rodeja, E., Silva, B.M. y Macías, F. (1987). Andosols developed from non-volcanic materials in Galicia (NW of Spain). *Journal of Soil Science*, 38, 573-591.

Gil, A., Macías, F., Monterroso, C., Val, C. (1990). Influence of waste selection in the dump reclamation at Puentes mine. *Reclamation, treatment and utilization of Coal Mining Waster. (Ed. A.K.M. Rainbow). 203-208. Balkema, Rotterdam. CL*

García-Rodeja Gayoso, E.; Monterroso Martínez, C.; Martínez Cortizas, A. (1998). Podzols from Coastal Areas in northwestern Spain. Proceedings of the 16 World Congress of Soil Science, 20-26/08/1998, Montpellier (France). ISSS-AISS-IBC-SICS-AFES.

García-Rodeja, E. & Fernández, V. (1998) Mass Balance and soil studies at Sor Catchments, Spain. En: M. Forsius et al. (Eds.) 'Integrated Monitoring: Environmental Assessment through Model and Empirical Analysis'. Finish Environment Institute. ISBN 952-0302-7.

García-Rodeja, E.; Fernández Sanjurjo, M.J. y Fernández Vega, V. (1998). Input-outpot ion fluxes in the river Sor catchment (Galicia, NW Spain). *Chemosphere*, 36 (4-5):1107-1112.

Guitián Rivera, F. y Calvo de Anta, R. (1981).- Evolución de los minerales primarios de las rocas graníticas de Galicia. Aplicación de las técnicas de microscopía electrónica y análisis con microsonda. *Anales de Edafología y Agrobiología,* 40, 1687-1706.

Jones, H.E.; Madeira, M.; Herraez, L., Dighton, J., Fabiao, A.; González Rio, F., Fernández Marcos, M., Gómez, C., Tome, M., Feith, H., Magalhaes, M.C., Howson, G. (1999). The effect of organic matter management on the productivity of *Eucalyptus globulus* stands in Spain and Portugal: tree growth and litter decomposition in relation to site and treatment. *Forest Ecol. Manag.* 122: 73- 86

López, A., García, C., y Macías, F. (1985). Meteorización de las granulitas de Cabo Ortegal. Cuad.Lab.Xeol. de Laxe, 9: 349-377. A

Lozano Cerezo, M.L., Fernández Marcos, M.L., Alvarez Rodriguez, E. (1997). Modificación de las propiedades físicas de un estéril de cantera por la adición de lodo de depuradora de aguas residuales. *Edafología* 3: 13-24.

Lozano Cerezo, M.L.; Alvarez Rodriguez, E., Fernández Marcos, M.L. 1997. Modificación de las propiedades químicas de un estéril de cantera por la adición de lodo de depuradora de aguas residuales. *Edafología* 3: 125-141.

Lozano, M.L., Fernández Marcos, M.L., Alvarez, E. (1999). Heavy metals in mine soils amended with sewage sludge. *Land Degradation and Development* 10: 555- 564.

Macías, F., Puga,M., Guitián, F., (1978). Caracteres ándicos en suelos sobre gabros de Galicia. *An. Edaf. Agrobiol.*, 37: 187-203. A

Macías, F., García-Rodeja, E., Puga, M. y Guitián, F. (1980). Origen y distribución de la gibbsita en Galicia. *An. Edaf. Agrobiol.*, 39: 1533-1563.

Macías, F., Calvo de Anta, R., García-Rodeja, E., Silva, B. (1982). El material original: su formación e influencia en las propiedades de los suelos de Galicia. *An. Edaf. Agrobiol.*, 41: 1747-1786. A

Macías, F. , Fernández, M.L., Chesworth,W. (1987). Transformations mineralogiques dans les podzols et les sols podzoliques de Galice (Nw Espagne). En: *Righil,D. et Chauvela,A. Ed. "Podzols et podzolisation".* A.F.E.S. et I.N.R.A. Paris. A

Macías, F. C. García, B.M. Silva, E. García-Rodeja G., M.T. Taboada (1988). Micromorfología y génesis de Podsoles y suelos podsólicos. *An. de Edaf. y Agrobiol.* XLVII(1-2): 431-464.

Macías, F. y Calvo de Anta, R. (1992). Suelos de la provincia de La Coruña (Mapa escala 1:200.000). 85 pp.. Ed. Diputación Provincial de La Coruña. Macías, F. (1996). Los suelos de mina: Su recuperación. En Evaluación y Manejo de Suelos. Eds. Aguilar, J., Martinez Raya, A. y Roca Roca, A. Junta de Andaluc¡a, 227-243. Granada. CL

Macías, F. y Chesworth, W. (1992). Weathering in humid regions, with emphasis on igneous rocks and their metamorphic equivalents. En: *Weathering, soils and paleosols. Ed. Martini & Chesworth. Elsevier. Holanda.* Chap. 12, 283-306. CL

Macías, F., y Calvo de Anta, R. (1992). Caractérisation pédogéochimique des sols de la Galice (NW Espagne) en relation avec la diversification lithologique. Mise en évidence d'un milieu de transition entre les domaines tempérés et subtropicaux humides. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t.315, Série II, p.1803-1810. A

Macías, F. (1996). Mecanismos de amortiguación de ácidos: Aplicación a la determinación de las Cargas Críticas de Acidez de Suelos. XIII Congreso Latinoamericano de Ciencia do Solo. Aguas de Lindoia. Sao Paulo. (Brazil). CD, Software Grafico Comercio e Serviços Ltda. A

Macías, F., y Calvo de Anta, R.(1998). Los Suelos de Galicia En: "Atlas de Galicia". *Gabinete de Presidencia. Xunta de Galicia. (en prensa).*

Macías, F. (2001). Cargas críticas de contaminantes: Un criterio de evaluación de la sensibilidad de la anturaleza para la ordenación de las actividades humanas. *Xunta de Galicia.* (en prensa).

Macías, F. y Calvo de Anta, R. (2001). Mapa de Solos de Galicia (1:50.000). HOJA 2 , CELEIRO. *Xunta de Galicia*

Macías, F.; Camps, M.; Rodríguez, L.; Barreal, E. (2001). Calidad de suelos en el entorno de Meirama. En: La central térmica de Meirama y su entorno. Unión FENOSA, pág 225-256.

Martínez Cortizas, A., Ramil Rego, P., García-Rodeja Gayoso, E. & Moares Domínguez, C. (1993): Suelos de montaña y ciclos de estabilidad/inestabilidad en las vertientes de Galicia (NW España). En: Pérez Alberti, A. Guitián Rivera, L. & Ramil Rego, P. (Eds.) *La Evolución del Paisaje en las Montañas del Entorno de los Caminos Jacobeos*, pp. 107-125. Xunta de Galicia.

Martínez Cortizas, A., Nóvoa Muñoz, J.C., Pontevedra Pombal, X., García-Rodeja, E. & Llana Rodríguez, C. (1997a). Paleocontaminación: evidencias de contaminación atmosférica antrópica en Galicia durante los últimos 4000 años. *Gallaecia*, 16: 7-22.

Martínez Cortizas, A. (1996). Evolución de los suelos durante el Cuaternario reciente en las Sierras Septentrionales de Galicia. En: Pérez Alberti, A. & Martínez Cortizas, A. (Coords.) *Avances en la Reconstrucción Paleoambiental de las Áreas de Montaña Lucenses*. Diputación de Lugo.

Martínez Cortizas, A., Pontevedra Pombal, X., Nóvoa Muñoz, J.C. & García-Rodeja, E. 1997b. Four thousand years of atmospheric Pb, Cd and Zn deposition recorded by the ombrotrophic peat bog of Penido Vello (northwerstern Spain). *Water, Air & Soil Pollut.*, 100: 387-403.

Martínez Cortizas, A. & Pérez Alberti, A. (Coords.) (1999). Atlas climático de Galicia. Consellería de Medio Ambiente. Xunta de Galicia

Martínez Cortizas, A., Pontevedra Pombal, X., García-Rodeja, E., Nóvoa Muñoz, J.C. & Shotyk, W. (1999). Mercury in a spanish peat bog: archive of climate change and atmospheic metal deposition. *Science*, 284: 939-942.

Martínez Cortizas, A., Pontevedra Pombal, X., Nóvoa Muñoz, J.C. & García-Rodeja, E. (2000). Turberas de montaña del noroeste de la Península Ibérica. *Edafología*, 7: 1-29.

Martínez Cortizas, A. (2001a). Lead measurements in peat bogs in Spain. Workshop: Integrated assessment for policy analysis of transboundary pollutant control. *GKSS Research Center, Geesthacht (Hamburg), Germany, Session 1: Measured spatial patterns and temporal trends of lead in Europe.*

Martínez Cortizas, A. (2001b). La reconstrucción de paleoambientes cuaternarios: ideas,ejemplos y una síntesis de la evolución del Holoceno en el NW de la Península Ibérica. *Estudos Cuaternários-Quaternary Studies* (en prensa).

Merino, A.; García-Rodeja, E. (1986). Mobility of sulphate in experimentally acidified soils of Galicia (NW Spain). *Water, Air & Soil Pollution* 87:23-37.

Merino, A.; Alvarez, E.; García-Rodeja, E. (1994) Response of some soils of Galicia (NW Soain) to H2SO4 acidification. *Water, Air and Soil Pollution* 74, 89-101. 1994.

Merino, A; García-Rodeja Gayoso, E. (1997). Heavy metal and Al mobilization in soils from Galicia (NW Spain) a consequence of an experimental acidification. *Applied Geochemistry* 12, 225-228.

Merino, A., Edeso, J. M., (1999). Soil fertility rehabilitation in young *Pinus radiata* D. Don plantations from northern Spain after intensive site preparation. For. Ecol. Manag. 116, 83-91.

Merino, A., Macías, F., García-Rodeja, E. (2000). Element fluxes and acid-buffering reactions in acidified soils from a humid-temperate region of South Europe. *Water, Air and Soil Pollution*, 120, 217-228.

Moares Domínguez, C.; Taboada Rodríguez, T.; García-Rodeja, E.; Martínez Cortizas, A. (1996). Tendencias a la podsolización durante el cuaternario reciente en áreas de montaña. En: A. Pérez Alberti & A. Martínez Cortizas 'Avances en la Investigación Paleoambiental en las Areas de Montaña Lucenses. Cap.VII: Exma. Diputación Provincial de Lugo. 1996. CL.

Monterroso, C; Alvarez, E.; Macías, F., (1993). Caracterización de los suelos de la escombrera de la mina Puentes en proceso de restauración ambiental. *Cuad. Lab. Xeol. Laxe*, 18, 337-343.

Monterroso, C; Alvarez, E.; Macías, F., 1994. Speciation and Solubility Control of Al and Fe in Minesoil Solutions. *The Science of the Total Environment*, 158,31-43.

Monterroso, C., Macías, F. (1998). Application of the test-mineral method to the study of minesoil geochemistry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 1741-1748.

Monterroso, C.; Macías, F. (1998). Drainage waters affected by pyrite oxidation in a coal mine in Galicia (NW Spain): Composition and stability mineral. *The Science of the Total Environment*, 216, 121-132.

Monterroso C; Macías, F. (1998). Prediction of the acid generating potential of coal mining spoils. *International Journal of Mining Reclamation & Evironment*, 12:5-9.

Monterroso, C.; Macías, F.; Gil Bueno, A.; Val Caballero, C. (1998). Evaluation of the land reclamation project at the As Pontes Mine (NW Spain) in relation to the suitability of the soil for plant growth. *Land Degradation & Development*, 9:441-451

Monterroso, C., Alvarez, E.; Fernández M.L., Macías, F., (1999). Geochemistry of aluminium and iron in mine soils from As Pontes, Galicia (NW Spain). *Water, Air & Soil Pollution*, 110, 81-102. A

Nóvoa Muñoz, J.C. y García Rodeja Gayoso, E. (1997). Capacidad de neutralización de ácidos y su relación con las propiedades de suelos de bosque de Galicia. Edafología (Boletín de la SECS), 2, 37-48, 1997.

Nóvoa Muñoz, J.C.; Urrutia, M.; Martínez Crtizas, A. &E. García-Rodeja Gayoso (1998). Proton Buffering capacity of acid soils from Galicia. 1998. Proceedings of the 16 World Congress of Soil Science, 20-26/08/1998, Montpellier (France). ISSS-AISS-IBC-SICS-AFES. En CD-ROM (CIRAD).

Otero, X.L., Huerta-Díaz, M.A., Macías, F., (2000). Heavy metal geochemistry of salt marsh soils from the Ria of Ortigueira (mafic and ultramafic areas, NW Iberian Peninsula). *Environmental Pollution,* 110, 285-296.

Otero, X.L., Sánchez, J.M.; Macías, F.. (2000). Bioaccumulation of Heavy Metals in Thionic Fluvisols by a Marine Polychaete: The role of Metal Sulfides. *J. Environ. Quality* 29. 1133-1141.

Otero, X.L.; Sánchez, J.M., Macías, F., (2000). Nutrient status in tall and short forms of *Spartina maritima* in the salt marshes of Ortigueira (NW Iberian Peninsula) as related to physicochemical properties of the soils. *Wetlands* 20, 461-469.

Otero, XL, JM ,Sánchez y F.Macías (2000b). Bioacumulation of heavy metals inthionic fluvisols by a marine polychaete: The role of metal sulfides. *J. Environ. Qual.* 29:1133-1141.

Pérez Alberti, A. 1986. *A Xeografía*. Ed. Galaxia. Vigo. 274 pp.

Pérez Alberti, A. & Valcárcel Díaz, M. 1998. Caracterización y distribución espacial del glaciarismo en el noroeste de la Península Ibérica. En: A. Gomez Ortiz & A. Pérez Alberti (Eds.) *Las Huellas Glaciares de las Montañas Españolas*. Servicio de Publicacions da Universidade de Santiago de Compostela, pp. 17-54.

Pérez Otero, A. y Calvo de Anta, R. (1992). Soil pollution in copper sulphide mining areas in Galicia (N.W. Spain). *Soil Technology,* vol.5, 271-281.

Pérez-Batallón, P., Merino, A., Macías, F. (1998). Flujos de CH4 y N2O en un suelo forestal del Norte de España bajo diferentes manejos de restos de corta. *Edafología*, 5, 47-58.

Pérez-Batallón, P.; Merino, A., Macías, F. (1998). Descomposición, Biomasa microbiana y emisión de CO2 en un suelo forestal bajo diferentes manejos selvícolas. *Edafología*, 5, 83-94.

Pontevedra Pombal, X., García-Rodeja, E. & Martínez Cortizas, A. 1996a. Caracterización edafo-geomorfológica de las turberas de las "Serras Orientais" de Galicia. En: Pérez-Alberti, A., Martini, P., Chesworth, W. & Martínez-Cortizas, A. (eds.) *Dinámica y Evolución de Medios Cuaternarios*, Xunta de Galicia, Santiago de Compostela, pp. 243-258.

Pontevedra Pombal, X., Martínez Cortizas, A. & García-Rodeja, E. 1996b. Caracterización físico-química de depósitos orgánicos en la 'Serra dos Ancares' (NW ibérico): origen y evolución. En: Pérez-Alberti, A. & Martínez-Cortizas, A. (eds.), *Avances en la Reconstrucción Paleoambiental de las Áreas de Montaña Lucenses*. Diputación Provincial de Lugo, Lugo, pp. 91-119.

Pontevedra Pombal, X., Martínez Cortizas, A. & García-Rodeja, E. 2001. Turberas de Galicia: procesos formativos, distribución y valor medioambiental. El caso particular de las 'Serras Septentrionais'. *Chioglossa* (en prensa).

Renshaw, M.; Fernández Vega, V. & García-Rodeja Gayoso, E. (1997) Aplicación del modelo Magic a la predicción de la acidificación de suelos y aguas superficiales en la cuenca del rio Sor. Nova Acta Científica Compostelana (Bioloxía) 8, 111-129.

Romero, R., Robert, M., Elsass, F. y García, C. (1992). Abundance of halloysite neoformation in soils developed from crystalline rocks. Contribution of trasmission electron microscopy. *Clay Minerals,* 27: 35-46

Romero, R., Robert, M., Elsass, F. y García, C. (1992). Evidence by trasmission electron microscopy of weathering microsystems in soils developed from crystalline rocks. *Clay minerals,* 27: 21-33.

Sánchez, J.M., X.L. Otero, J. Izco, & F. Macías (1997). Growth form and population density of *Spartina maritima* (Curtis) Fernald in Northwest Spain. *Wetlands* 17: 368-374.

Sánchez-Rodríguez, F., (2000). Crecimiento y producción de *Pinus radiata* en Galicia. Tesis doctoral. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela, Lugo (Spain).

Sánchez-Rodríguez, F., Álvarez González, J. G., Rodríguez-Soalleiro, R., Rojo Alboreca, A., (1998). Resultados prrliminares del estudio de curvas de calidad de estación y de los factores ecológicos implicados en la productividad de *Pinus radiata* D. Don en Galicia (España). *Primer Congreso IUFRO sobre Silvicultura en América Latina, Valdivia (Chile).*

Taboada, T. Romero, R y Garcia, C. (1992). Weathering evolution of biotita granite (El Pindo, Galicia, NW Spain). *Chemical Geology,* 84, (1/4): 130-132.1990.

Taboada, T., Romero, R., y García, C. (1992). Transformaciones micromorfológicas y mineralógicas en el proceso de meteorización de las granodioritas de Viveiro y Traba. *Cuad. do Lab. Xeol. de Laxe,* 17: 73-84.

Taboada, T. Romero, R y Garcia, C. (1996). La disolución de abrasión en el estudio de los procesos de meteorización y edafogénesis de rocas graníticas de Galicia. *Edafología,* nº 3-1; 57-64

Taboada, T. and García, C. (1999). Smectite formation produced by wuathering in coarse granite saprolite in Galicia (NW Spain). *Catena,* 35 (2-4): 283-292.

Taboada, T. y García, C. (1999). Pseudomorphic transformation of plagioclase during the weathering of granitic rocks in Galicia (NW Spain). *Catena,* 35 (2-4): 293-304.

Urrutia, M., García-Rodeja, E., Macías, F., (1987). Procesos de oxidación de la pirita en medios superficiales: potencial acidificante e interés para la recuperación de suelos de la mina. Cuad. Lab. Xeol. de Laxe, 11: 131-145.

Urrutia, M., García-Rodeja, E., Macías, F., (1988). Aplicación de disoluciones no tamponadas para la extracción de Al "activo" ligado a la materia orgánica en suelos de Galicia. An. Edaf. Agrobiol., 47: 1289-1301. A

Urrutia, M., García-Rodeja, E., Macías, F., (1992). Sulfide oxidation in coal-mine dumps: Laboratory measurement of acidifying potential with H2O2 and its application to characterize spoil materials. Environmental *Management,* 16, nº1: 81-89. A

Walse, C., Schöpp, W., Warfinge, P., Sverdrup, H. (1996). Modeling long term impact on soil acidification for six sites in Europe. report 3:1996. Department of Chemical Engineering II. Lund University.