

MUNIBE (Ciencias Naturales - Natur Zientziak)	Nº 47	17-27	SAN SEBASTIAN	1995	ISSN 0214-7688
---	-------	-------	---------------	------	----------------

Los suelos de la cuenca del Embalse del Añarbe. Propiedades e influencia de sus características en la calidad de las aguas

The soils of the watershed of Añarbe's reservoir.
Properties and influence of their management on the quality of the waters.

PALABRAS CLAVE: Suelos, nutrientes, calidad de aguas, metales pesados, planificación del suelo.

KEY WORDS: Soils, nutrients, water, quality, heavy metals, land use.

Agustín MERINO ⁽¹⁾
Iosu AZBITARTE ⁽²⁾
Teresa TABOADA ⁽¹⁾
Itziar LARUMBE ⁽³⁾

RESUMEN

Los suelos de la cuenca del embalse del Añarbe se caracterizan, en general, por su riqueza en materia orgánica, carácter fuertemente ácido, niveles medios-bajos de fósforo biodisponible e importantes contenidos de Al y Mn libres. Bajo condiciones de buena cubierta vegetal existen bajas tasas de movilización de elementos en suspensión. Sin embargo, debido a las fuertes pendientes y elevada pluviosidad de la cuenca, en terrenos desprovistos de vegetación pueden producirse fenómenos erosivos de consideración. Las actividades que pueden potenciar el paso de elementos a las aguas superficiales son las talas extensivas y las obras de apertura de pistas, por sus efectos en el incremento de las tasas de erosión y de mineralización de materia orgánica. Como consecuencia, se puede favorecer el paso de partículas sólidas y de nutrientes, como nitratos o fosfatos. Además, durante períodos prolongados de saturación del suelo por agua puede producirse movilización de manganeso.

SUMMARY

The soils of the Añarbe's reservoir are characterized by their high content in organic matter, strong acidity, moderate/low level of bio-available phosphore and high content of free Al and Mn. Owing to the steep slopes and high rainfall, severe erosive processes can occur in deforested zones. The human activities that could enhance the transfer of elements to the surface waters are the whole-tree harvesting and the construction of roads dueto their effects in the increases of rates of erosion and organic matter mineralization. As a consequence of these activities, the transfer of the solid particles and nutrients, as nitrate and phosphate, may increase. Futhermore, during long periods of saturation of soil by water, a remarkable mobilization of manganese may take place.

INTRODUCCION

La mayor parte del agua que llega a los cauces superficiales pasa en algún momento a través de uno o más horizontes del suelo. Durante este paso tiene lugar la transferencia de elementos desde el medio edáfico al acuático, con lo que las aguas pueden ver incrementado su contenido en nutrientes o compuestos tóxicos, si los hubiere. El paso de elementos del suelo a las aguas es un proceso natural que, salvo en excepciones, no suele plantear problemas ambientales. No obstante, la cantidad de elementos transferidos a las aguas puede potenciarse como consecuencia de actividades humanas que tienen como soporte el suelo.

Las actividades realizadas en la cuenca del Añarbe que potencialmente pueden repercutir en la movilidad de elementos desde el suelo a las aguas son, fundamentalmente, las talas forestales y la apertura de pistas. Otras actividades como la agrícola y la ganadera, en principio, parecen presentar menor incidencia dada su escasa representación. Los efectos de las talas forestales se basan en dos factores. Por una parte, en el aumento de la tasa de erosión, proceso a través del cual puede tener lugar la transferencia de partículas en suspensión y de cualquier elemento químico fijado a éstas. Por otra, en el incremento de la tasa de mineralización de materia orgánica, que tiene lugar como consecuencia del aumento de temperatura del suelo al quedar expuesta la superficie de éste a la radiación solar directa. Este último aspecto puede revestir cierta importancia puesto que la mayor parte de muchos nutrientes se encuentran incorporados a la materia orgánica. Con ello, una

(1) Departamento de Edafología. Universidad de Santiago, Santiago de Compostela.

(2) Basoinsa, Ingeniería Medioambiental y Agroforestal. Bilbao.

(3) Mancomunidad del Añarbe, San Sebastián.

elevada descomposición de compuestos orgánicos del suelo puede implicar la movilización de nutrientes a las aguas. Por otro lado, la apertura de pista forestales, especialmente cuando no se planifican las vías de drenaje, supone un riesgo manifiesto de erosión. Paralelamente, también pueden removilizar determinados elementos al poner a la intemperie la roca fresca.

El objetivo del presente trabajo es el de contribuir al conocimiento de los suelos de la cuenca del Añarbe (estudios anteriores serían los de CATALAN, 1988; PERALTA *et al.* 1990 y LIZEAGA *et al.*, 1992), así como relacionar sus propiedades y manejo con los procesos relacionados en la transferencia de elementos desde el suelo a las aguas. El estudio forma parte de un proyecto mucho más amplio con el que se está elaborando una propuesta de Ordenación de Usos de la Cuenca del Añarbe que tiene como fin el de preservar la calidad de las aguas y la vida útil del embalse.

MATERIAL Y METODOS

Condiciones ambientales. La cuenca del Añarbe se localiza en el límite septentrional de Guipúzcoa y Navarra, a poca distancia del mar Cantábrico (figura 1). Comprende una extensión total de 6912 ha. El 70 % de esta superficie se encuentra ocupada por bosque de frondosas (hayas y robles, fundamentalmente); el 20%, por coníferas (pinos y alerces) y el 0.8 %, por bosques mixtos. La superficie de matorral comprende el 3% y las zonas degradadas o de cultivo, el 6%. Descripciones detalladas de la vegetación y asociaciones vegetales pueden encontrarse en CATALAN (1988) y PERALTA *et al.* (1990).

La pluviosidad anual alcanza un valor medio de 2380 mm, mientras que la temperatura media es 12.5°C (datos de la estación de Artikutza). El régimen climático general se define como Subtrópico templado con invierno lluvioso. El régimen de humedad del suelo es perúdic, puesto durante todos o casi los meses del año la precipitación excede a la evapotranspiración, si bien en posiciones de valle, donde se impide el drenaje, el régimen es de tipo ácuico. El régimen térmico del suelo es méxico, debido a que la temperatura media anual del suelo se encuentra entre 8 y 15°C. El Índice Bioclimático Potencial para la producción vegetal se cifra entre 12 y 15 ubc, no existiendo ninguna limitación por sequía, aunque sí por frío en las cotas más altas de la cuenca (MERINO, 1990).

Según CAMPOS (1979) la litología de la cuenca consiste en esquistos pizarrosos, rocas graníticas, areniscas, calizas y sedimentos aluviales.

Suelos empleados. Se han seleccionado un total de 60 puntos de toma de muestra de suelo. La

selección efectuada incluye una extensa combinación de los diferentes factores ambientales que pueden encontrarse en la cuenca que alimenta al embalse del Añarbe. De este modo, se seleccionaron suelos desarrollados a partir de diferentes tipos de materiales geológicos (esquistos, granitos, calizas, coluviones de areniscas y sedimentos aluviales), localizados en diferentes ambientes geomorfológicos (zonas de depósito, erosión, karst, etc.), posiciones fisiográficas y asociaciones vegetales (bosques de hayas, pinos, alerces, matorrales, prados, etc.) (tabla 1).

En 22 de los 60 puntos seleccionados se han tomado muestras de cada uno de los horizontes que constituyen el suelo. En los 38 puntos restantes se ha recogido la capa superficial del mismo, hasta una profundidad de 15 cm. En ambos casos, la muestra superficial se obtiene a partir de una muestra múltiple, constituida por 5 submuestras tomadas al azar en la superficie del entorno elegido.

Adicionalmente, en 6 suelos desarrollados sobre esquistos se ha procedido a la extracción de la fracción líquida de los horizontes superficiales por el método de desplazamiento. Estas disoluciones se consideran un ambiente intermedio entre el sistema edáfico y el acuático, por lo que su análisis proporcionaría información sobre la posible transferencia en disolución de elementos a las aguas.

Tabla 1. Número de puntos de toma de muestra, en función del tipo de vegetación y material geológico.

	Esquistos	Granitos	Areniscas	Sed. aluviales	Calizas
Matorral	12	3		1	
Hayas	9	4	2		2
Pinos	16	1			
Alerces	3	2			
Robles	3	1			
Todos	43	11	2	1	2

Métodos analíticos. Las determinaciones analíticas de los suelos se realizan con muestras secadas al aire y tamizadas por 2 mm. En ellas se han efectuado las determinaciones de los siguientes parámetros:

- textura, por el método de la pipeta de Robinson,
- pH en H₂O y KCl 1 M (relación suelo: disolución de 1:2.5),
- C, N y S totales, empleando un autoanalizador LECO
- Ca, Mg, Na, K y Al de cambio, mediante extracción con NH₄Cl 1 M, por el método de PEECH *et al.* (1947). La extracción se realiza a valores de pH del suelo.

- Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICe), estimada mediante la suma de cationes básicos (Ca, Mg, Na y K) y Al extraídos con NH₄Cl (KAMPRATH, 1970)

- Fe, Al y Mn extraídos con Citrato-Bicarbonato (según HOLGREN, 1968), extractante que solubiliza los óxidos y oxihidróxidos de Fe y Mn, tanto cristalinos como amorfos, además de los ligados a la materia orgánica.

- Fe, Al y Mn extraídos con pirofosfato sódico (BASCOMB 1968). Mediante este extractante se obtienen el Fe y Mn complejados con la materia orgánica. Aunque no es un método específico para el Al, la determinación de este elemento se realiza con fines de clasificación.

- P biodisponible, mediante extracción con una disolución de NaOH 0.1 M (SHARPLEY y SMITH, 1992).

Los análisis de Ca, Mg, Na, K, Al, Fe y Mn fueron realizados mediante Espectrofotometría de Absorción o Emisión Atómica, según el caso. El PO₄ fue analizado mediante colorimetría del complejo molibdato-metavanadato sódico (WATANABE y OLSEN, 1962).

En las disoluciones del suelo, previa filtración por 0.45 µm, fueron determinados los siguientes parámetros:

- pH, potenciométricamente, con electrodo de vidrio.

- SO₄²⁻ y NO₃, mediante cromatografía iónica
 - PO₄³⁻, por colorimetría del complejo molibdato-metavanadato (WATANABE y OLSEN, 1962)

- Ca, Mg, Na, K y Mn, mediante espectrofotometría de absorción o emisión atómica, según el caso.

- Al, por colorimetría de pirocatecol violeta (DOUGAN y WILSON, 1974). Previamente, la muestra se somete a digestión ácida suave en caliente.

RESULTADOS

Clasificación y cartografía de suelos

En la figura 1 y tabla 2 se recogen los tipos de suelos más extendidos en función del material geológico. Como puede apreciarse, sobre esquistos se desarrollan preferentemente suelos de tipo A ócrico/B cámbico, clasificados como Cambisoles dístricos. Sobre granitos dominan los Regosoles úmbricos, con un horizonte profundo de tipo A úmbrico. Sobre areniscas y sobre sedimentos aluviales son frecuentes los Cambisoles gleicos, constituidos por un horizonte A ócrico sobre un B cámbico con propiedades hidromórficas. Por último, las calizas desarrollan suelos delgados con un único horizonte A de tipo úmbrico, clasificados como Cambisoles réndricos.

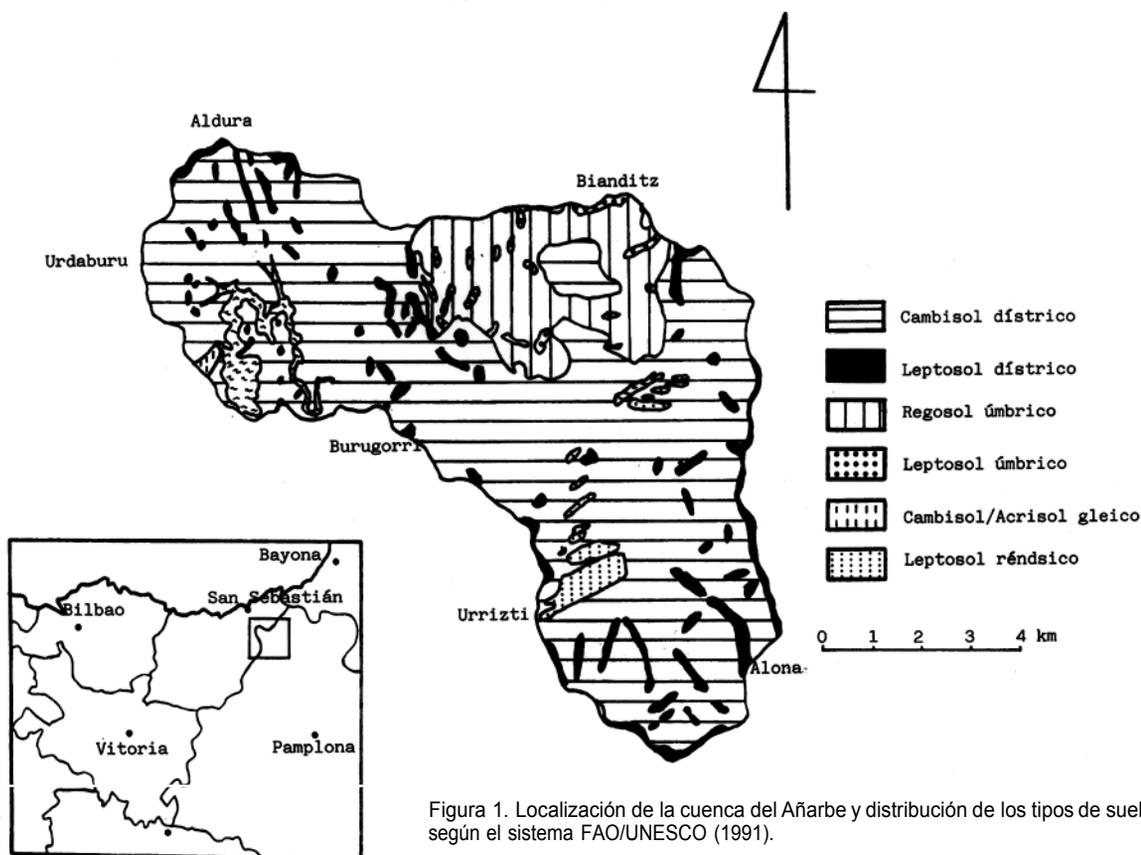


Figura 1. Localización de la cuenca del Añarbe y distribución de los tipos de suelos según el sistema FAO/UNESCO (1991).

Tabla 2. Tipos de suelos de la cuenca del Añarbe desarrollados a partir de la litología existente

MATERIAL GEOLOGICO	SECUENCIA TIPICA DE HORIZONTES	SUELOS MAS FRECUENTES	
		FAO/UNESCO (1991)	USDA (1991)
ESQUISTOS	A ócrico/B cámbico	Cambisoles dístricos	Typic Dystrochrepts
	A úmbrico	Leptosoles dístricos	Lithic Udorthents
	A úmbrico/B cámbico	Cambisoles húmicos	Typic Haplumbrepts
GRANITOS	A úmbrico	Regosoles úmbricos	Typic Haplumbrepts
	A úmbrico	Leptosoles úmbricos	Lithic Udorthents
	A úmbrico/B cámbico	Cambisoles húmicos	Typic Haplumbrepts
COL. ARENISCAS	A ócrico/B cámbico	Cambisoles gleicos	Oxyaquic Dystrochrept
		Acrisoles gleicos	Aquic Paleudult
SED. ALUVIALES	A úmbrico/B cámbico	Cambisoles gleicos	Oxyaquic Haplumbrepts
		Leptosoles úmbricos	Lithic Udorthents
CALIZAS	A úmbrico	Leptosoles réndrico	Lithic Hapludoll
		Cambisoles húmicos	Typic Haplumbrepts

Propiedades físicas y químicas de los suelos.

Textura. La mayor parte de los suelos sobre esquistos presentan una textura de tipo franco arcillosa (fp) o franca (f) y suelen presentar como fracción más abundante el limo fino. Las clases texturales más frecuentes en los suelos desarrollados sobre granitos son la franca (f) y la franco arenosa (fa), siendo la arena gruesa la fracción más abundante. Los dos suelos sobre coluvión de areniscas presentan como textura más frecuente la franco arcillo limosa (fpl), mientras que en el suelo sobre sedimentos aluviales la arena gruesa es la fracción más abundante. Por último, los dos suelos sobre calizas muestran texturas de tipo franco arcilloso (fp).

Acidez. Los valores de pH más bajos, tanto en H₂O como en KCl, corresponden a los suelos desarrollados sobre esquistos, granitos y, especialmente, areniscas. Estos suelos muestran, por lo general, valores inferiores a 4.6 para el pH medido en H₂O y de 4.0 para el medido en KCl (figura 2a). Con todo ello, pueden considerarse como suelos de carácter fuerte ácido. Los suelos desarrollados sobre sedimentos aluviales y calizas, generalmente, presentan valores de pH medido en H₂O entre 5.0 y 5.5; mientras que el rango para el pH en KCl es de 4.0 a 4.5. Se trata, pues, de suelos con una acidez moderada.

Materia orgánica, Nitrógeno y Azufre totales. Los mayores contenidos en **materia orgánica** corresponden a los horizontes superficiales de los suelos sobre esquistos, granitos y sedimentos aluviales, los cuales, por lo general, presentan valores superiores al 8%. Los horizontes superficiales de los suelos sobre areniscas y calizas exhiben también conteni-

dos importantes, aunque sin alcanzar los niveles de los suelos anteriores (figura 2b). Con la excepción del los horizontes Ah₂ de los Regosoles sobre granitos, los horizontes subsuperficiales presentan contenidos muy inferiores, normalmente, menores de 3%.

En relación a la riqueza en materia orgánica, el contenido en **N total** es también elevado (figura 2c). En este sentido, puede comentarse la estrecha relación encontrada entre materia orgánica y el N ($r=0.94$).

El contenido de **S total** oscila entre 0.03 y 0.27 %. Los mayores contenidos se encuentran en los horizontes superficiales, lo cual es lógico si se considera que, al igual que en el caso del N, la mayor parte del S forma parte de compuestos orgánicos (figura 2d). De este modo, el contenido de S se relaciona significativamente con el de materia orgánica ($r=0.70$) y con el de N ($r=0.60$).

P biodisponible. En la figura 2e se muestra el contenido de P biodisponible (PBD) de los suelos estudiados. Como puede observarse, la mayor parte de los suelos exhiben contenidos de PBD comprendidos entre 150 y 200 mg kg⁻¹. Valores similares han sido observados por SHARPLEY y SMITH (1992) para suelos de tipo Inceptisol, que pueden considerarse moderados. En tan sólo dos horizontes superficiales se observan valores elevados, superiores a 350 mg kg⁻¹.

No se aprecian diferencias significativas en el contenido de PBD entre los diferentes tipos de suelo o materiales geológicos, si bien los horizontes con propiedades hidromórficas tienden a presentar mayor contenido en PBD. En general, el aumento de la disponibilidad del P en condiciones anaeróbicas ocu-

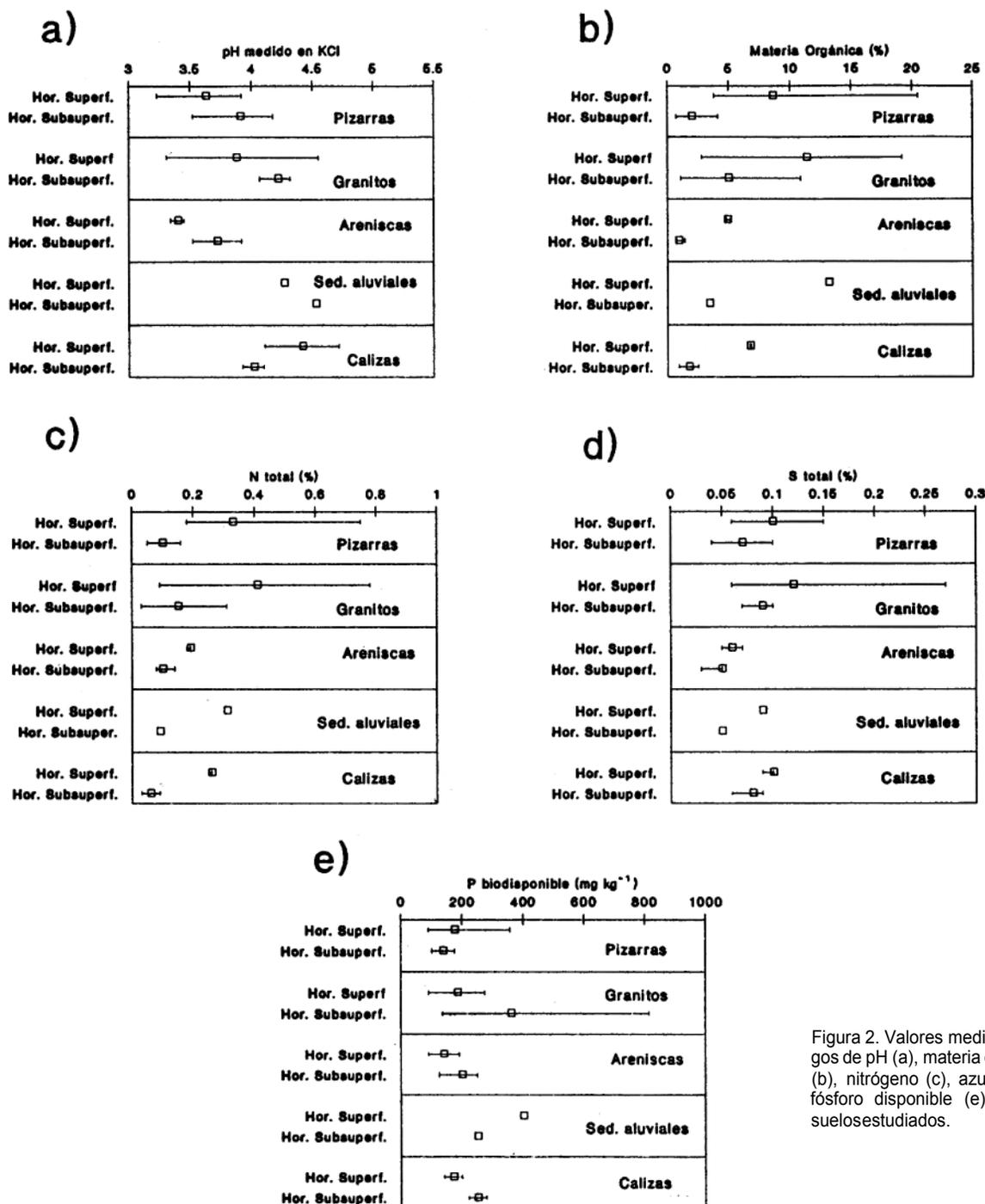


Figura 2. Valores medios y rangos de pH (a), materia orgánica (b), nitrógeno (c), azufre (d) y fósforo disponible (e) en los suelos estudiados.

re frecuentemente y se debe a la transformaciones que tienen lugar en la química del Fe y de la materia orgánica, relacionados con la adsorción del P por el suelo.

Capacidad de intercambio catiónico y cationes de cambio. Como puede observarse en la figura 3a, con independencia del material de partida, la mayor parte de los suelos estudiados presentan valores de CICE inferiores a 10 cmol_c kg⁻¹, que pueden consi-

derarse bajos. Estos reducidos valores de CICE están determinados por tres factores. Por una lado, se encontraría la elevada acidez de estos suelos, que reduce considerablemente la capacidad para proporcionar carga a los componentes edáficos, fundamentalmente, a los compuestos orgánicos. Por otra parte, se debe también a la dominancia de minerales de baja carga, caolinita y gibbsita, en los suelos de esquistos y vermiculita, clorita, caolinita, illita y el estratificado

clorita-vermiculita en los de granitos (MORENO e IÑIGUEZ, 1981). Por último, en el caso de los suelos de granitos y sedimentos aluviales, además de estos motivos, habría que considerar también su bajo contenido en arcilla.

Los menores niveles de cationes básicos de cambio se encuentran en los suelos más ácidos, los desarrollados sobre esquistos, granitos y coluviones de areniscas. En ellos el contenido total de estos elementos se cifra en menos de 2 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, representando menos del 30% del complejo de cambio (figuras 3b y 3d). Los suelos sobre sedimentos aluviales y calizas muestran contenidos más elevados, aunque no llegan a alcanzar valores importantes (máximo 9 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$); no obstante, a diferencia de los suelos anteriores, en éstos los cationes básicos suelen saturar la mayor parte del complejo de cambio.

Como corresponde a su fuerte carácter ácido, el Al es el elemento más abundante en el complejo de cambio de estos suelos, ocupando más del 70% del mismo en la mayoría de las muestras. Los suelos

con mayor contenido en Al de cambio son los desarrollados sobre esquistos, granitos y areniscas, que en la mayor parte de los casos muestran valores entre 5 y 6 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ (figura 3c). Niveles de Al de cambio más moderados se encuentran en los suelos sobre sedimentos aluviales y calizas. Cabe destacar el hecho de que los dos suelos sobre calizas estudiados contienen cantidades significativas de este elemento, lo que, junto a los bajos valores de pH, indica un considerable grado de acidez.

Los suelos derivados de esquistos y granitos presentan valores de Mn de cambio moderados-bajos y se corresponden, en general, con los observados en suelos ácidos sobre estos mismos materiales localizados en otras zonas del norte de la península Ibérica (Departamento de Edafología, Universidad de Santiago, datos no publicados). No obstante, en 4 muestras se aprecian valores entre 0.2 y 0.4 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, que pueden considerarse altos. En los dos suelos desarrollados sobre coluviones de areniscas se

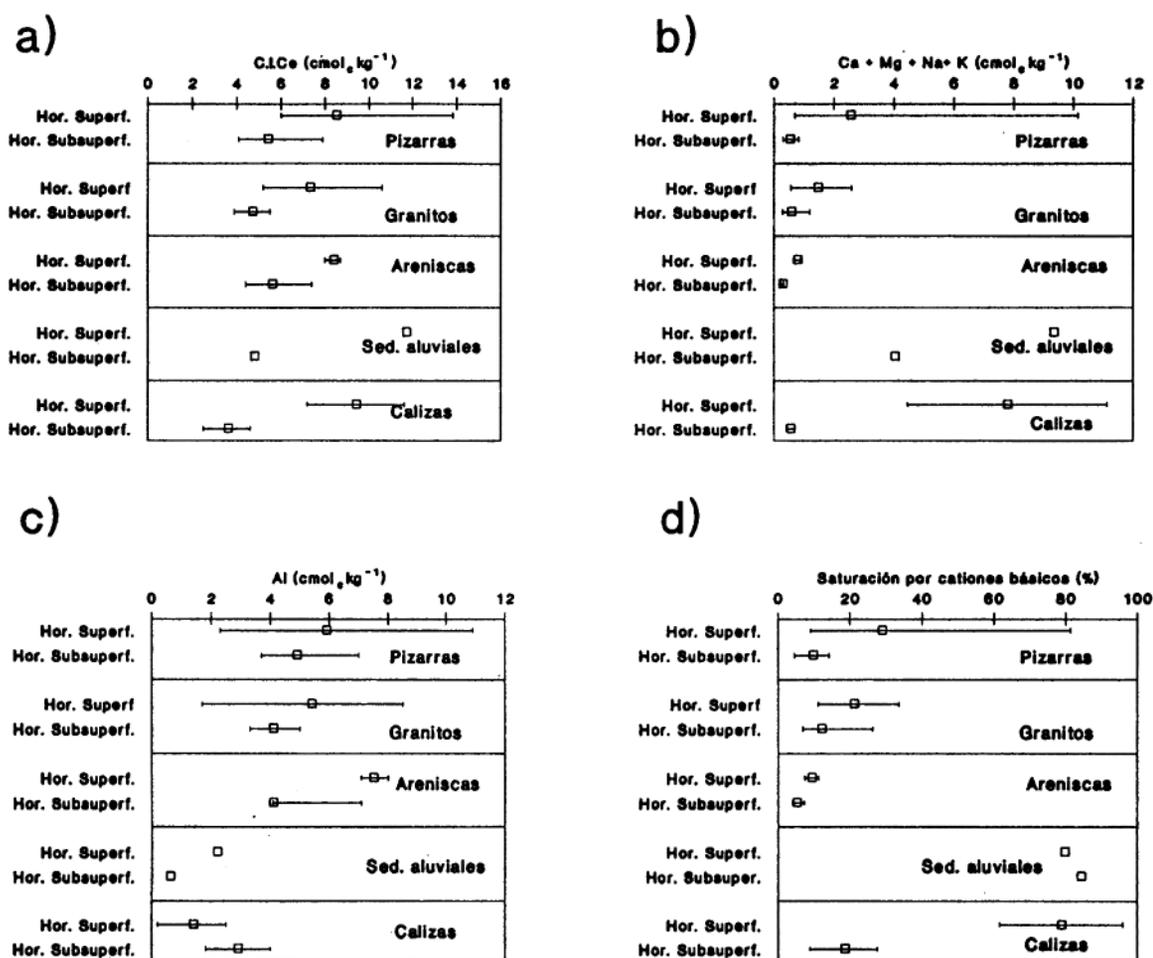


Figura 3. Valores medios y rangos de Capacidad de Intercambio Catiónico (a), cationes básicos de cambio (b), aluminio de cambio (c) y saturación por cationes básicos (d) en los suelos de la cuenca del Añarbe.

observan valores bajos, inferiores a $0.05 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Los suelos sobre sedimentos aluviales muestran valores elevados, superiores a $0.12 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, lo que es característico de suelos con propiedades hidromórficas. Elevados niveles, entre 0.17 y $0.25 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, se encuentran también en los suelos sobre calizas, lo que también es frecuente en este tipo de suelos.

Al y Mn libres. Los mayores valores de **Al libre total** (extraído con DC) se observan en los suelos sobre granitos, esquistos y calizas, especialmente en los horizontes superficiales, donde se aprecian contenidos superiores a 5 g kg^{-1} de suelo. Los suelos sobre coluviones de areniscas presentan los menores contenidos en Al, en torno a 3 g kg^{-1} (figura 4a).

El **Al ligado al materia orgánica** (extraído con pirofosfato) constituye la fracción más importante de este elemento en los horizontes superficiales de los suelos sobre esquistos, granitos y areniscas. Como corresponde a su mayores contenidos en materia orgánica, los suelos sobre granitos exhiben los mayores valores de esta fracción de Al (figura 4b).

El contenido de **Mn libre total** (extraído, con DC) en las muestras superficiales de los suelos de esquistos oscila entre 100 y 1100 mg kg^{-1} . En granitos este rango es de 100 a 700 mg kg^{-1} (figura 4c). La mayor parte de los valores encontrados en estos suelos pueden considerarse moderados y se corresponden con los observados en otros suelos desarrollados sobre esquistos y granitos del norte de la península Ibérica (BARRAL, 1987; Dept. Edafología, Universidad Santiago, datos sin publicar).

Los dos suelos desarrollados sobre coluviones de areniscas presentan un importante incremento de Mn con la profundidad -desde 200 a 1800 mg kg^{-1} (figura 4c). Este aumento se encuentra relacionado con la existencia de condiciones temporales de hidromorfía, que favorecen el enriquecimiento de las formas reducidas de Mn.

Con respecto a los suelos anteriores, los desarrollados sobre sedimentos aluviales y calizas presentan contenidos elevados de Mn libre total (figura 4c). Así, el contenido de este elemento en el perfil de Labeta (Cambisol gleico sobre sedimentos aluviales) puede considerarse muy elevado, 4000 mg kg^{-1} ,

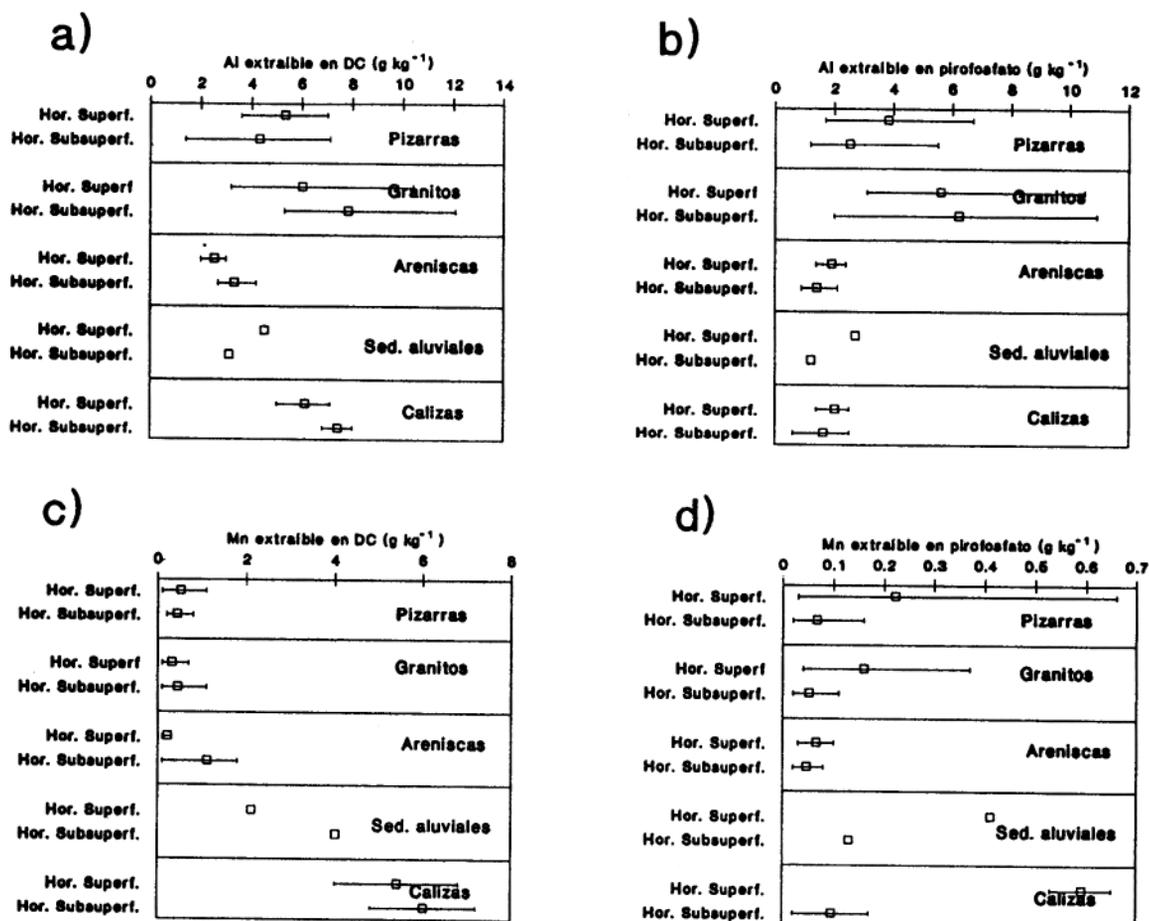


Figura 4. Valores medios y rangos de Al y Mn extraíbles en DC y pirofosfato.

encontrándose por encima del rango observado en suelos similares en Europa (1200-1900 mg kg⁻¹, KABATA-PENDIAS y PENDIAS, 1986; BARRAL, 1987). Este valor excepcionalmente elevado podría tener su origen en aportes de escorias originadas en antiguos hornos de fundición localizados en las inmediaciones. Los niveles de Mn de los dos suelos de caliza estudiados son también elevados, aunque dentro del rango que normalmente muestran los suelos calizos de Europa (250-7700 mg kg⁻¹, KABATA-PENDIAS y PENDIAS, 1986; BARRAL, 1987).

Al igual que sucede con el Mn libre total, el contenido de **Mn ligado a materia orgánica** presenta importantes diferencias entre los tipos de suelo y material geológico de partida. Los valores de Mn ligado a materia orgánica se relacionan con el Mn libre total ($r=0.77$). En los suelos sobre esquistos el contenido de Mn extraíble en pirofosfato oscila entre 20 y 660 mg kg⁻¹. En los suelos de granitos el rango observado es de 20-360 mg kg⁻¹ (figura 4d). En ambos tipos de suelos el Mn ligado a la materia orgánica representa un importante porcentaje del Mn libre total.

Los suelos desarrollados sobre calizas y sedimentos aluviales presentan valores más elevados que los anteriores, 20-650 mg kg⁻¹. Sin embargo, a diferencia de ellos, la fracción orgánica de este metal no constituye la forma más abundante de Mn.

Composición de las disoluciones de suelo.

En la tabla 3 se recoge la composición química de las fracciones líquidas de los horizontes superficiales de 6 suelos sobre esquistos, bajo cubierta de pinos. Como puede apreciarse, en general, muestran valores de pH considerablemente ácidos y, en relación a esto, niveles significativos de Mn y Al, especialmente en las muestras más ácidas. Las concentraciones de SO₄ pueden considerarse de tipo intermedio. Los niveles de NO₃ son moderados, si bien puede observarse valores algo elevados en el suelo recientemente talado. El resto de parámetros -cationes alcalinos y alcalinotérreos, PO₄ y NO₂ producidas se encuentran en concentraciones bajas.

Aproximación a la evaluación de la transferencia de elementos desde los suelos a las aguas.

Transferencia de partículas sólidas. En la figura 5 se recogen los valores del factor K de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE). Este parámetro evalúa la susceptibilidad intrínseca del suelo frente a la erosión, para lo cual considera el contenido de materia orgánica, textura y estructura del suelo. El rango de valores posibles de este factor ca de 0 a 1. Como puede apreciarse, la mayor susceptibilidad a la erosión se observa en los suelos de esquistos y areniscas, con valores medios en torno a 0.12. Los desarrollados sobre granitos muestran valores bajos, siempre inferiores a 0.1; en ellos el elevado contenido en materia orgánica y textura gruesa confiere una considerable resistencia al arrastre de partículas.

La tasa de erosión hídrica del suelo viene determinada, además de por la susceptibilidad del suelo, por otros factores igualmente importantes como son la capacidad de arrastre de la lluvia, el grado y tipo de cubierta vegetal o la pendiente del terreno. La capacidad de arrastre de la lluvia se estima por medio del denominado factor R de la USLE. El valor que toma este parámetro en la estación de Articutza es de 490 J•m²•cm•hora⁻¹ (ICONA, 1988), el cual puede considerarse como muy elevado, entre los más altos de los registrados en la península Ibérica.

La cubierta vegetal protege de manera muy importante al suelo frente a la erosión. Atendiendo a la moderada-baja susceptibilidad a la erosión que presentan los suelos estudiados, las pérdidas de suelo esperables bajo cubierta arbórea con sotobosque bien desarrollado serían por lo general reducidas. No obstante, debido a las fuertes pendientes de la zona y a la considerable capacidad de arrastre de la lluvia en la cuenca, la eliminación de la cubierta vegetal implicaría un incremento notable de las pérdidas de suelo por erosión hídrica. En adición, una intensa actividad forestal, que incluya tareas de acondicionamiento del terreno, como son la eliminación de matorral, el arado o la quema de rastrojos, puede poten-

Tabla 3. Composición química de las fracciones líquidas extraídas de 6 horizontes superficiales de suelos desarrollados sobre esquistos y bajo bosque de pinos.

SUELO	Estado de la explotación	pH	Ca	Mn	Al	PO ₄	NO ₃	NO ₂	SO ₄
					mg L ⁻¹				
LURGORRI III	Tala reciente	4.00	7.77	0.52	0.40	0.01	42.23	0.01	3.11
LURGORRI IV	Pinar maduro	4.89	4.55	0.18	0.02	0.01	10.22	0.01	4.80
PENINSULA I	Tala antigua	4.70	2.44	0.38	0.01	0.01	2.06	0.01	4.84
PENINSULA II	Pinar maduro	4.36	4.00	0.85	0.10	0.01	16.10	0.01	5.65
ARRAZABAL I	Tala antigua	4.31	3.22	0.68	0.62	0.01	0.12	0.01	8.08
ARRAZABAL II	Pinar maduro	4.29	3.66	0.85	0.38	0.01	18.47	0.01	6.40

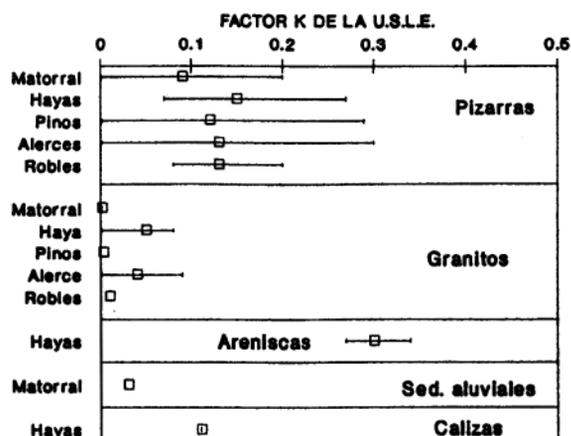


Figura 5. Valores medios y rangos del factor K (susceptibilidad del suelo a la erosión) de la USLE.

ciar sustancialmente el problema. El efecto de las técnicas de manejo forestal en las pérdidas de suelo ha sido evaluado en parcelas dedicadas a explotación forestal en zonas próximas del País Vasco (EDESO et al., 1994; MERINO et al., 1995). Este estudio revela que determinadas labores de acondicionamiento del terreno (extracción de tocones y subsolado lineal, principalmente), potencian considerablemente la erosionabilidad del suelo, por la reducción en cubierta vegetal y pérdida de materia orgánica que producen.

La apertura de pistas forestales puede presentar un efecto similar al de las talas extensivas. Por una parte, el terreno sobrante de la apertura suele depositarse por debajo de la pista. Estos depósitos, sin vegetación y con muy bajo contenido en materia orgánica, constituyen una fuente considerable de elementos sólidos. Por otro lado, cuando no se planifican sistemas de desagüe, las pistas favorecen la formación de vías de agua, que poseen un extraordinario poder erosivo.

Nitrógeno. En todos los suelos estudiados el contenido de N total es elevado. En los suelos ácidos, la gran mayoría de este elemento se encuentra incorporado a la materia orgánica y, por tanto, en forma poco movilizable por disolución. La liberación de N a la fracción líquida de suelo y, posteriormente, a las aguas se produce a través de la mineralización y nitrificación de la materia orgánica del suelo, procesos que en suelos ácidos bajo importante cubierta vegetal transcurren con relativa lentitud (TAMM, 1991).

No obstante, la tasa de mineralización, con la consiguiente movilización de N, puede aumentar sensiblemente cuando se retira la cubierta vegetal debido al aumento de temperatura que se produce. Ejemplos de aumentos de NO_3 en los suelos y aguas con posterioridad a talas extensivas han sido obser-

vados por numerosos investigadores (LAWRENCE y DRISCOLL, 1988; NEAL et al., 1992; DAHLGREN y DRISCOLL, 1994). En el caso de la cuenca del Añarbe, el aumento de NO_3 observado en la fracción líquida del suelo que recientemente ha sido talado (Lurgorri III) puede reflejar esta tendencia. No obstante, para extraer conclusiones definitivas sobre este efecto sería necesario realizar una toma de muestra sistemática, enfocada a caracterizar este proceso.

Azufre. La movilización de este elemento puede producirse fundamentalmente mediante procesos de mineralización de la materia orgánica. Al igual que en el caso del N, la mayor parte del S se encuentra incorporado a compuestos orgánicos. Bajo condiciones normales, la transferencia de S desde el suelo a las aguas –en forma de SO_4^- , no debe revestir gran importancia puesto que, a diferencia del NO_3 , este anión tiende a ser retenido por las partículas del suelo en forma poco reversible (MITCHELL et al., 1989). Habría que considerar también el hecho de que las esquistos suelen contener cantidades significativas de elemento, generalmente en forma de pirita. La oxidación de este mineral, si existiera, puede constituir una fuente adicional de S a las aguas.

Fósforo. El P biodisponible, potencialmente utilizable por los organismos del agua, puede ser transferido desde el suelo a las aguas en forma soluble o adsorbida a partículas del suelo. Como se ha comentado anteriormente, los contenidos de P biodisponible observados en los suelos de la cuenca Añarbe pueden considerarse de tipo intermedio-bajo. Como corresponde los suelos ácidos, la mayor parte de este P debe encontrarse de forma retenida, escasamente reversible. Las bajas concentraciones de PO_4 en las fracciones líquidas analizadas en los suelos del Añarbe reflejan esta escasa movilidad. Tan sólo habría que considerar un riesgo moderado de movilización de P en los suelos sometidos a inundación reciente. En ellos, la reducción química de los óxidos de Fe, donde se encuentra adsorbido el P, puede remobilizar una parte de este elemento (SANYAL y DE DATTA, 1991). Con todo lo anterior, el riesgo más importante de transferencia de P a las aguas proviene de procesos de erosión de suelo, durante los cuales el P se transferiría junto a las partículas a las que se encuentra adsorbida.

Manganeso. Los contenidos de Mn libre total y ligado a materia orgánica, consideradas las fuentes más importantes de este elemento a las aguas, son elevados en los dos suelos de calizas y en el Cambisol gleico sobre sedimentos aluviales. El resto de los suelos estudiados –los derivados de esquistos, granitos y coluviones de areniscas– presentan valores moderados y, sólo en casos aislados, elevados. Los procesos que tienden a movilizar este ele-

mento son la acidificación y las condiciones anaeróbicas. La considerable acidez de estos suelos hace que éstos presenten una tendencia natural a movilizar Mn. Así, los moderados-altos niveles de Mn en disolución de las 6 fracciones líquidas analizadas reflejan la tendencia de estos suelos a la liberación de Mn. Por otro lado, debido a la reducción química de Mn en condiciones de anaerobiosis, una importante cantidad de este elemento puede pasar a las aguas durante períodos en los que el suelo se encuentra saturado en agua, de ahí los elevados contenidos de Mn en los suelos con propiedades hidromórficas.

Aluminio. Los suelos sobre esquistos, granitos y areniscas de la cuenca alta del Añarbe muestran elevados niveles de Al de cambio y de Al ligado a materia orgánica. Así mismo, las concentraciones de este elemento en algunas de las fracciones líquidas analizadas son considerables.

El proceso más importante de movilización de Al es la acidificación. En estudios de seguimiento realizados en zonas de talas extensivas se observan incrementos importantes de la movilización de Al, que suelen relacionarse un proceso de acidificación producida por un aumento de la tasa de nitrificación (LAWRENCE y DRISCOLL, 1988; NEAL et al., 1992; DHALGREN y DRISCOLL, 1994). Cabe señalar que se trata de suelos de tipo Podsol y Gleysol, muy ácidos y con una extraordinaria tendencia a movilizar Al.

Estudios realizados en cuencas de la Cornisa Cantábrica, en suelos similares a los de la cuenca del Añarbe, también sobre esquistos y granitos, (ALVAREZ et al., 1992; Departamento de Edafología, Universidad de Santiago, datos no publicados) indican que, a pesar de que este elemento se encuentra en fases potencialmente movilizables y existen niveles significativos en la fracción líquida del suelo, el Al no pasa fácilmente a las aguas superficiales. Las diferencias en la geoquímica de Al entre los suelos del norte peninsular y los de latitudes superiores puede radicar en el menor grado de acidez, que reduciría el paso de este elemento a las aguas superficiales.

Cationes básicos: Ca, Mg, Na y K. Los suelos estudiados presentan contenidos muy reducidos de cationes básicos de cambio. En relación con este hecho, las 6 fracciones líquidas analizadas muestran concentraciones bajas de estos elementos. Con todo ello, bajo condiciones naturales, la cantidad de estos macronutrientes que puede ser transportada a las aguas no parece que pueda ser importante. No obstante, la movilización de estos iones puede incrementar sustancialmente si se favorecen los procesos de mineralización de materia orgánica.

CONCLUSIONES

Los suelos de la cuenca del Añarbe son ricos en materia orgánica, muestran un carácter fuertemente ácido, escasa cantidad de nutrientes y abundante Al de cambio. La mayor parte de los suelos constan de un horizonte A ócrico o úmbrico sobre un B de tipo cámbico y se clasifican como Cambisoles dístricos, Cambisoles húmicos y Regosoles úmbricos.

Los resultados del trabajo ponen de manifiesto que si bien los suelos muestran una resistencia considerable a la erosión, por su elevado contenido en materia orgánica, debido a las fuertes pendientes y elevada pluviosidad de la zona, pueden producirse fenómenos erosivos de consideración en zonas desprovistas de vegetación.

Las actividades humanas relacionadas con los suelos que pueden potenciar la transferencia de elementos a las aguas son las talas forestales y la apertura de pistas. Por sus efectos que tienen sobre la tasa de erosión y mineralización de la materia orgánica, estas actividades pueden favorecer el paso de elementos sólidos (provocando turbidez y potenciando la colmatación del embalse), así como de fósforo, nitratos y manganeso. Adicionalmente, durante los períodos en los que los suelos se encuentran saturados por agua se puede favorecer el paso de manganeso.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo forma parte del proyecto "Estudio de Propuesta de Usos de la Cuenca del Embalse del Añarbe para Salvaguardar las Características de Calidad del Agua y Vida Útil del Embalse", financiado por la Mancomunidad de Aguas del Añarbe. Los autores agradecen también las sugerencias planteadas por un revisor anónimo.

BIBLIOGRAFIA

- ALVAREZ, E., MARTINEZ, A. & CALVO, R.
1992 Geochemical aspects of aluminium in forest soils in Galicia (NW Spain). *Biogeochemistry* 16, 167-180.
- BARRAL, M. T.
1987 *Estudio de las separaciones de hierro y manganeso en suelos y sedimentos de Galicia*. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago.
- BASCOMB, C. L.
1968 Distribution of pyrophosphate extractable iron and organic carbon in soils of various groups. *J. Soil Sci.*, 19, 251-256.
- CAMPOS, J.
1979 Estudio geológico del Pirineo Vasco al W del río Bidasoa. *Munibe* 31, 3-139.

CATALAN, P.

- 1988 *Geobotánica de las cuencas del Bidasoa y Urumea (NW de Navarra-NE de Guipúzcoa). Estudio ecológico, de los suelos y vegetación de la cuenca de Artikutza (Navarra).* Universidad del País Vasco, Bilbao.

DHALGREN, R. A. & DRISCOLL, C. T.

- 1994 The effects of whole-tree clear-cutting on soil processes at the Hubbard Brook experimental forest, New Hampshire, USA. *Plant and Soil* 158, 239-262.

DOUGAN, W. R. & WILSON, A. L.

- 1974 The adsorptometric determination of aluminium in water. A comparison of some chromogenic reagents and development of an improved method. *Analyst* 99, 413-430.

EDES0, J. M., GONZALEZ, M. J., MERINO, A., MARAURI, P. & LARRION, J. A.

- 1994 *Primeros datos sobre las pérdidas de suelo en explotaciones forestales en la vertiente cantábrica del País Vasco*, 21-30. En García-Ruiz, J. M., Lasanta, T. (eds.), Efectos Geomorfológicos del Abandono de Tierras. Sociedad Española de Geomorfología, Zaragoza.

FAO/UNESCO

- 1991 *Mapa Mundial de Suelos*. FAO, Roma.

HOLMGREN, G. S.

- 1967 A rapid citrate-dithionite extractable iron procedure. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 31, 210-211.

ICONA

- 1988 *Agresividad de la lluvia en España*. ICONA. MAPA. Madrid.

KABATA-PENDIAS, A. & PENDIAS, H.

- 1984 *Trace elements in soils and plants*. CRC Press, Florida.

KAMPRATH, E. J.

- 1970 Exchangeable aluminium as a criterio for liming leached minerals soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34, 252, 254.

LAWRENCE, G. B. & DRISCOLL, C. T.

- 1988 Aluminium chemistry of a whole-tree-harvested watershed. *Environ. Sci. Technol.*, 22, 1293-1299.

LIZEAGA, J., ZAPIRAIN, J. & LIZEAGA, M.

- 1992 Estudio de las temperaturas del suelo a 15, 30 y 45 cm de profundidad en 3 ecosistemas (hayedo, robledal, y argomal) de Artikutza (Navarra). *Cuadernos de Sección, Eusko Ikaskuntza* 20, 313-325.

MITCHELL, M. J., DRISCOLL, C. T., FULLER, R. D., DAVID, M. B. & LIKENS, G. E.

- 1989 Effect of whole-tree harvesting on the sulfur dynamics of a forest soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53, 933-940.

MERINO, A.

- 1990 Bioclimatología de Guipúzcoa. *Lurralde* 13, 63-116.

MERINO, A., GONZALEZ, M. J. & EDES0, J. M.

- 1995 Modificaciones en las características de los suelos de la vertiente cantábrica del País Vasco producidas por prácticas forestales. *Lurralde* 18, 293-300.

MORENO, A. & IÑIGUEZ, J.

- 1981 Estudio mineralógico de las arcillas en los suelos de la Navarra húmeda. *Ann. Edafol. Agrobiol.*, 40, 1147-1183.

NEAL, C., REYNOLDS, B., SMITH, C. J., HILL, S., NEAL, M., CONWAY, T., RYLAND, G. P., JEFFREY, H., ROBSON, A. J. & FISHER, R.

- 1992 The impact of conifer harvesting on stream water pH, alkalinity and aluminium concentrations for the British uplands: an example for an acidic and acid sensitive catchment in mid-Wales. *The Sci. Total. Environ.*, 126, 75-87.

PEECH, M., ALEXANDER, L. T., DEAN, L. A. & REED, J. F.

- 1947 *Methods of Soils Analysis for Soil Fertility Investigation*. U. S. Dept. Agric. C.

PERALTA, J., IÑIGUEZ, J. & BASCONES, J. C.

- 1990 Suelos y vegetación de las Peñas de Aya (Navarra y Guipúzcoa). *Ann. Edafol. Agrobiol.*, 49, 499-522.

SANYAL, S. K. & DE DATTA, S. K.

- 1991 Chemistry of Phosphorus transformations in soil, 2-120. En Stewart, B. A. (ed.), *Advances in Soil Science*. Springer-Verlag, Nueva York.

SHARPLEY, N. A. & SMITH, S. J.

- 1992 Application of phosphorus bioavailability indices to agricultural runoff and soils. *Standard Technical Publication* 1162, 43-57.

TAMM, C. O.

- 1991 *Nitrogen in terrestrial ecosystems. Questions of productivity, vegetation changes, and ecosystem stability*. Springer-Verlag, Nueva York.

USDA

- 1991 *Soil Taxonomy. A basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. SCS-USDA, AH.No. 436, Washington.

WATANABE, F. S. & OLSE, S. R.

- 1962 Colorimetric determination of phosphorous in water extracts of soils. *Soil Sci.*, 93.