

CARACTERIZACIÓN EN ENTORNO SIG DE LOS SUELOS DEL PARQUE NACIONAL DEL TEIDE. DINÁMICA DE NUTRIENTES Y CARBONO EN LOS SUELOS

**CARMEN D. ARBELO¹, ANTONIO R. RODRÍGUEZ¹, JUAN SÁNCHEZ²,
JESÚS S. NOTARIO¹, LUIS RECATALÁ², JUAN L. MORA¹, J. ASTERIO GUERRA¹,
CECILIA M. ARMAS¹**

RESUMEN

Como resultados obtenidos podemos destacar el mapa de la distribución de las unidades cartográficas de suelos o edafopaisajes en el Parque Nacional del Teide y la base de datos. Se han identificado once unidades taxonómicas del sistema FAO-WRB.

Se analizaron y cartografiaron 14 parámetros analíticos de un total de 173 puntos de muestreo y se realizaron 23 mapas, con su correspondiente base de datos. Los contenidos en C orgánico y N total son muy bajos, el pH es ácido en la mayor parte de los suelos, los niveles de P, Ca y Mg asimilables son muy bajos, al igual que los de K asimilable, la textura es mayormente francoarenosa con abundante pedregosidad y los suelos tienen una moderada a muy baja capacidad de retención de agua.

El empleo de diversas técnicas de análisis multivariante (PCA, DCA, CCA) ha permitido identificar los factores ecológicos relevantes en relación a los gradientes edáficos en el área de estudio. Entre los más significativos se cuentan la altitud y la orientación, la topografía y, muy particularmente, el material de origen del suelo, cuya influencia resulta especialmente importante en los suelos en las primeras etapas de su formación.

Se ha analizado asimismo la dinámica de nutrientes y carbono en el ecosistema y se concluye que los mayores aportes de N y P al suelo se producen con los tejidos lignificados de retamar en los meses de marzo y julio, y los de K tienen lugar con los tejidos lignificados del matorral de rosálito en el mes de julio, existe un alto contenido en biomasa microbiana, con mayores valores en la parcela de matorral de rosálito, y la actividad respiratoria de la biomasa no tiene una relación muy clara con la humedad del suelo, sino más bien con la temperatura.

SUMMARY

Among the results obtained, we can outline the map of soil cartographic units, or soilscares in Teide National Park, as well as the database. Eleven taxonomic units of the FAO-WRB soil classification system have been identified.

¹Departamento de Edafología y Geología, Facultad de Biología, Universidad de La Laguna, 38204 La Laguna, carbelo@ull.es

²CIDE. Centro de Investigaciones sobre Desertificación, CSIC-UV-GV, Albal, Valencia.

Fourteen analytical parameters have been determined and mapped, from 173 sampling points, and 23 maps have been generated, with their respective databases. Soil organic C and total N contents are rather low, soil pH are mostly acidic, and available P, Ca, Mg and K levels are also low. Soil texture is most often sandy loam, with a high degree of stoniness. Soil water holding capacity values are also very low.

The use of several techniques of multivariate data analysis (PCA, DCA, CCA) has allowed identifying the relevant ecological factors regarding to soil gradients in the study area. Among the most significant ones, we can cite the elevation and aspect, topography and very especially soil parent material, whose influence has been shown to be very important in early-developing soils.

Nutrient and carbon dynamics in the ecosystem have also been studied. We can conclude that main N and P supplies to soil come from broom woody debris along March-June, whereas K supplies have their origin in woody debris from *rosalito* shrub in July. A high content in microbial biomass can be found, with higher contents in the plot under *rosalito* shrub. Biomass respiratory activity seems not to be related to soil moisture content, but rather to soil temperature.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales fundamentos de protección del Parque Nacional del Teide es el mantener la dinámica y estructura funcional de los ecosistemas de que se compone.

Aunque tradicionalmente los suelos han sido considerados solamente como un factor de producción para las actividades agropecuaria y silvícola, cuando no como un mero soporte de actividades y lugar de emplazamiento de áreas urbanas e infraestructuras de todo tipo, más recientemente y sobre todo como consecuencia de una emergente conciencia ambiental que nos ha permitido valorar la finitud de los recursos naturales y nos ha imbuido la idea de sostenibilidad en todas nuestras actuaciones, se ha comenzado a considerar el papel ecológico del suelo y las importantes funciones reguladoras del equilibrio ambiental que el mismo realiza como soporte físico y funcional de todos los ecosistemas terrestres.

La conservación de los suelos de un territorio en buen estado de calidad para cumplir todas estas funciones, no sólo las productivas sino también las ambientales, es pues una necesidad ineludible ante la escasez de un recurso, que por poco conocido, ha sido a menudo no considerado y por tanto sobreexplotado y sobreutilizado, hasta casi su agotamiento en muchas regiones. Sin em-

bargo para conservar es necesario primero conocer y por lo tanto el conocimiento de las características de los suelos, de su funcionamiento como interfase ambiental y de sus posibilidades de utilización, es una tarea fundamental en la conservación de cualquier espacio.

Por todo ello y teniendo en cuenta además que entre los temas de investigación de interés para la administración del Parque, según el PRUG, figura el "estudio de los suelos con especial atención a su génesis y balance hídrico", se ha considerado interesante realizar una evaluación integral de los suelos de este Parque Nacional, con un enfoque dinámico y ecosistémico que permita integrar fácilmente la información obtenida en un programa más amplio de valoración del funcionamiento del ecosistema y que al mismo tiempo tenga un carácter eminentemente práctico y sea útil para la gestión.

Además, desde el punto de vista puramente científico es importante el avanzar en el conocimiento de los suelos de alta montaña en regiones volcánicas, poco estudiados en Canarias, de los procesos sucesionales evolutivos y regresivos que tienen lugar en ellos como consecuencia de unas particulares condiciones edafoclimáticas y de sus cualidades para soportar sistemas vegetales singulares. Para todo ello, el Parque Nacional del Teide constituye un marco único a nivel mundial.

Por regla general los parques nacionales son sede de ecosistemas singulares que es necesario conservar, tanto en su estructura como en su dinámica. En muchos de estos parques los recursos abióticos de estos ecosistemas, constituyen el fundamento de protección en sí mismos y en otros, elementos clave para el mantenimiento de la dinámica ecológica. Este es el caso de los suelos, que como soporte funcional de los ecosistemas terrestres juega un papel importante en la conservación de muchos ecosistemas peculiares y de hábitats de especies de interés.

La finalidad del presente estudio tiene pues una doble vertiente. Por un lado estrictamente científica, que pretende obtener un mejor conocimiento de las características, funcionamiento y dinámica de los suelos de origen volcánico en la alta montaña de Canarias, de los procesos edáficos que tienen lugar en unas condiciones edafoclimáticas particulares y de sus cualidades para producir biomasa y ser soporte de sistemas vegetales singulares.

Por otro lado el estudio ha tenido una finalidad eminentemente técnica, con la elaboración de una cartografía dinámica a escala detallada (1:10.000) de los tipos de suelos presentes, variabilidad y distribución espacial de parámetros determinantes de la calidad del suelo y una base de datos de suelos georreferenciada. Todo ello integrado en un entorno SIG que permita construir un Sistema de Información de Suelos (SIS) de gran interés para la gestión del Parque.

Las Cañadas del Teide constituyen un espacio geológico singular que incluye el Teide y otros grandes volcanes y el anfiteatro que les rodea, conformando un conjunto geomorfológico y biogeográfico bien individualizado y ya sobradamente conocido, visitado y estudiado desde los siglos XVI (Torriani), XVIII (Humboldt) o XIX (Berthelot) (MARTÍNEZ DE PISÓN & F. QUIRANTES 1981).

Antecedentes

Han sido numerosos los trabajos realizados sobre la geología de este espacio, estructura, materiales y génesis, así como de sus formaciones vege-

tales y aspectos biológicos en general. Sin embargo, la caracterización de los suelos del espacio que hoy ocupa el Parque Nacional no ha sido considerada en ningún caso con el objetivo único de evaluar y caracterizar la génesis y dinámica de los mismos, por lo que las aproximaciones al problema, las metodologías seguidas y los objetivos propuestos en los estudios hasta ahora realizados, han sido diferentes y muy dispares.

Los primeros estudios sobre los suelos de la isla de Tenerife, que de alguna manera recogen una descripción somera de los suelos de alta montaña, fueron realizados por HOYOS (1945, 1948), KUBIENA (1956) y SÁNCHEZ CALVO (1958, 1961). Sin embargo el primer trabajo en el que se hace un reconocimiento general de los suelos de la isla y se plasma su distribución espacial en un esquema cartográfico a escala 1:200.000 fue realizado por FERNÁNDEZ CALDAS *et al.* (1971), donde todo el territorio del Parque Nacional queda clasificado como *Litosuelos sobre rocas volcánicas*.

Un estudio en profundidad de algunos perfiles de suelos del entorno de Las Cañadas (Izaña, El Portillo) se realiza en TEJEDOR (1974) y en algunos trabajos posteriores donde se caracterizan desde el punto de vista físico químico y se clasifican estos suelos como *Andosuelos vítricos fuertemente desaturados (Umbric Vitrandepts y Andic Dystrochrepts)* (FERNÁNDEZ CALDAS *et al.* 1975, FERNÁNDEZ CALDAS & TEJEDOR 1975, QUANTIN *et al.* 1975). Otros trabajos publicados en esta misma época abundan sobre las características físicas, mineralógicas, etc. de estos dos perfiles (TEJEDOR *et al.* 1976, FERNÁNDEZ CALDAS *et al.* 1977, RODRÍGUEZ PASCUAL *et al.* 1978, ARBELO 1989).

En esta misma época, MORALES *et al.* (1977), describen la formación de suelos poligonales en Las Cañadas y hacen un detenido estudio geomorfológico y de las formaciones superficiales del Parque Nacional, que se vio completado más tarde en sus aspectos descriptivos y geográficos por el trabajo de MARTÍNEZ DE PISÓN *et al.* (1981).

Posteriormente (FERNÁNDEZ CALDAS & TEJEDOR 1988) se publica un esquema cartográfico

(escala aproximada de 1:200.000) de la distribución de los distintos tipos de suelos en la isla de Tenerife, en el que los suelos de Las Cañadas del Teide aparecen clasificados en su totalidad como *Litosoles*. En el último Atlas Temático de Canarias editado en el año 2001, aparece un mapa de suelos de la isla de Tenerife, modificado del publicado por FERNÁNDEZ CALDAS *et al.* en (1988), y en el que los suelos de este espacio se clasifican en las asociaciones *Afloramientos rocosos y Leptosoles y Andosoles vítricos y úmbricos, Cambisoles ándicos, Leptosoles, Regosoles y rocas*. (RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ & MORA 2001).

Como vemos los estudios realizados sobre algunos suelos del espacio considerado han sido escasos y sin un criterio objetivo de evaluar la calidad, características y distribución de los suelos en el mismo, y mientras unos son demasiado generalistas, otros son más específicos tratando aspectos concretos de la génesis, composición o características de los suelos.

En la actualidad el concepto de mapa de suelos está cambiando. Las nuevas demandas de información de suelos y la aparición de nuevas tecnologías exigen un replanteamiento radical de los procedimientos y también de los fundamentos tradicionales, basados en los mapas en formato papel y en sus correspondientes memorias. Actualmente la tendencia es hacia la elaboración de productos mucho más sofisticados y polifacéticos, capaces de almacenar y manipular una ingente cantidad de información, como son las Bases de Datos Georreferenciadas y los Sistemas de Información de Suelos (SIS) (ESB 1999). Tanto en el Manual de Procedimientos del European Soil Bureau (ESB), como en la Norma Técnica que adapta estos procedimientos para el territorio español (SÁNCHEZ DÍAZ *et al.* 2002) y que es la que hemos seguido en la realización de este trabajo, la cartografía y la Base de Datos Georreferenciada se basa en los conceptos de cuerpo edáfico y edafopaisaje.

Durante mucho tiempo se ha discutido si los suelos están constituidos por entidades físicas discretas que legitiman la elaboración de sistemas taxonómicos naturales o si por el contrario la edafosfera ha de conceptualizarse como un continuo,

en el que cualquier clasificación no es más que un modelo artificial del intelecto humano. En este trabajo y siguiendo el ESB 1999, el cuerpo edáfico se reconoce como un objeto artificial, pero susceptible de ser caracterizado y tipificado en el espacio tridimensional que es el continuo edafosférico.

Mapas paramétricos

El concepto de calidad del suelo definido como "La capacidad de un tipo específico de suelo para funcionar dentro de los límites de ecosistemas naturales o manejados, en el sostenimiento de la productividad vegetal y animal, en el mantenimiento o mejora de la calidad del aire y del agua y en el soporte de la salud humana y el hábitat" (SSSA 1995, KARLEN & ANDREWS 2000) es un paradigma científico surgido a partir de los años 90, junto a los modelos más holísticos del suelo y el reconocimiento de su multifuncionalidad (BLUM 2002), que ha llevado a un cambio de perspectiva en la evaluación de la edafosfera, desde la productivista a la ambientalista (RECATALÁ & SÁNCHEZ 2002).

Han sido numerosos los parámetros edáficos que se han propuesto como indicadores de la calidad del suelo y se han desarrollado también varios índices para evaluar esta calidad (RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ 2001). Sería prolijo enumerar aquí los índices propuestos y las series de datos mínimos que se han establecido como indicadores de la calidad del suelo, pero sí podemos decir que en todas ellas se considera alguna combinación, cuando no todas, de los siguientes parámetros: pH, carbono orgánico, nitrógeno total, fósforo, potasio, calcio y magnesio asimilables, pedregosidad, profundidad efectiva, granulometría, capacidad de retención de agua útil y capacidad de retención de agua a capacidad de campo.

Pues bien, estos parámetros son los que hemos utilizado para de alguna manera tener una visión general de la calidad de los suelos del Parque Nacional del Teide y para cumplir con uno de los objetivos propuestos, como es la confección de una cartografía que refleje la distribución espacial de estos parámetros indicadores, con indicación en cada caso de los puntos de muestreo georreferenciados y su correspondiente banco de datos.

Relaciones ecológicas suelo-ecosistema. Balance de nutrientes y carbono orgánico

Los aportes procedentes de la atmósfera y de la alteración del material de origen contribuyen al desarrollo y evolución a largo plazo de los suelos. Sin embargo, la principal fuente anual de nutrientes para la producción primaria proviene precisamente del reciclaje de los materiales constituyentes de la biomasa vegetal.

La magnitud y velocidad con que se produce este reciclaje dependerá fundamentalmente de la cantidad y características del material vegetal aportado, de las condiciones del suelo y de la actividad de los microorganismos responsables de la descomposición, la cual está en estrecha relación con las variaciones climáticas estacionales de temperatura y humedad edáfica. En los suelos de alta montaña la actividad biológica se ve ralentizada por las bajas temperaturas y las propias características edáficas de juventud de los materiales no facilitan este reciclaje (UGOLINI 1986, GONZÁLEZ MANCEBO *et al.* 1996), por lo que hemos considerado de interés evaluar estos procesos en los suelos del PN del Teide, según la metodología descrita más adelante.

Por otra parte, está unánimemente aceptado que el suelo constituye uno de los reservorios de carbono más importante del planeta, acumulando a nivel global 2300 Pg (2,3 billones de Tm), frente a los 38000 Pg acumulados en los océanos y los 5000 Pg de C de la litosfera, incluidos los combustibles fósiles. En la atmósfera se acumulan 720 Pg y en los seres vivos 550 Pg (LAL 2001). Aunque estos números pueden variar entre los diferentes autores (IPCC 1996), sí está reconocido que el carbono acumulado en forma de materia orgánica en el suelo (SOM) presenta un elevado dinamismo, participando activamente en los flujos e intercambios con la atmósfera, la biosfera, la hidrosfera e incluso con la litosfera, a través del carbono inorgánico (carbonatos) acumulado en los suelos de zonas áridas (IPCC 1996, LAL *et al.* 2000, KHANNA *et al.* 2001, etc.).

Este almacenamiento de carbono en los suelos, los convierte en uno de los más importantes sumideros de CO₂ existentes en el planeta y se han reali-

zando ya numerosos inventarios sobre la capacidad de secuestrar o de emitir CO₂ en diferentes tipos de suelos y de manejo (MACÍAS *et al.* 2001, ADAMS. 2002, etc.), aunque se sigue considerando la necesidad de mayor información y mejora en las bases de datos sobre el carbono almacenado en los sistemas edáficos del planeta (LAL *et al.* 1995).

Una cuestión importante a tener en cuenta a la hora de evaluar las capacidades de los diferentes suelos y ecosistemas para secuestrar CO₂, es la naturaleza de los compuestos orgánicos que constituyen el carbono orgánico del suelo (SOC), considerándose habitualmente cuatro compartimentos: SOC activo o lábil, SOC lentamente oxidable, SOC oxidable muy lentamente y SOC pasivo o recalcitrante, siendo esta última la más efectiva en cuanto a su funcionamiento como sumidero de CO₂ (IPCC 1996, FRANKS *et al.* 2001, KHANNA *et al.* 2001, etc.). El carácter pasivo de este último tipo de compuestos orgánicos se puede deber, según la mayoría de los autores, a la formación de complejos organominerales con la fracción coloidal inorgánica del suelo, formación de complejos organometálicos insolubles (con aluminio fundamentalmente) o a un "secuestro físico" por encapsulamiento en los macro y microagregados del suelo (LAL 2000, MACÍAS *et al.* 2001, SCHULZ *et al.* 2002, etc.).

En las Islas Canarias, a pesar de que se trata de una zona con un alto riesgo de desertificación y donde los modelos de cambio climático, a pesar de su carácter generalista, predicen modificaciones drásticas y negativas en el funcionamiento del suelo y los ecosistemas, no se ha realizado ningún estudio encaminado a conocer el potencial de los suelos para secuestrar carbono y así incrementar su contenido orgánico, ni se conocen con certeza las reservas de materia orgánica en los suelos, ni qué suelos se comportan como emisores netos o sumideros netos de CO₂, ni siquiera la naturaleza de los complejos organominerales que se forman con los "minerales de ordenación corta" característicos de los suelos de origen volcánico y que han sido reconocidos en otros lugares, como altamente eficientes en cuanto al secuestro de CO₂.

Objetivos

El objetivo general de este trabajo es presentar los resultados de *“una evaluación detallada de los suelos del Parque Nacional del Teide, con base cartográfica en un entorno digital (SIG) y con un enfoque dinámico y ecosistémico que facilita la integración de la información obtenida en programas más amplios de seguimiento ecológico, al mismo tiempo que se crea un banco de datos sobre los suelos del Parque, fácilmente actualizable y de gran utilidad para la gestión. Además se han establecido las relaciones ecológicas suelo-vegetación en cuanto al reciclado de nutrientes y dinámica del carbono en suelos y biomasa”*.

Este objetivo general se ha logrado a base de una serie de objetivos concretos que en síntesis son:

- a) Cartografía digital a escala detallada (1:10.000) de la distribución de los principales edafopaisajes (unidades cartográficas) del Parque Nacional y de las relaciones entre los diferentes cuerpos edáficos (unidades taxonómicas) dentro de cada edafopaisaje, con su correspondiente base de datos.
- b) Cartografía digital a escala detallada (1:10.000) de la variabilidad y distribución de parámetros edáficos relevantes para establecer la calidad del suelo (materia orgánica, pH, textura, nutrientes, etc.), acompañada de su correspondiente base de datos.
- c) Balance de nutrientes ligados a la materia orgánica para cada uno de los sistemas suelo-vegetación identificados en el Parque Nacional.

MATERIAL Y MÉTODOS

Los trabajos realizados para la elaboración de la cartografía digital detallada de la distribución de los principales unidades cartográficas de suelos en el Parque Nacional con su correspondiente base de datos, se centraron inicialmente en la recopilación de antecedentes y material de base (p.ej. geología, vegetación, ortofotos y otra cartografía temática digital) y en la realización del modelo digital del terreno (MDT).

Posteriormente se elaboraron los premapas y se llevó a cabo la fotointerpretación de las ortofotos mediante el método fisiográfico, para luego diseñar y planificar la prospección de campo, eligiendo varias áreas modelo (p.ej. Pista Siete Cañadas, Zapatilla de la Reina, Valle de Chafarí, etc).

A partir de este diseño y esta planificación se llevó a cabo el reconocimiento general de la zona y el establecimiento inicial de los modelos suelo-paisaje más comunes en el Parque Nacional, para posteriormente realizar la prospección de campo que consistió en la realización de: 205 anotaciones de campo, que no conllevaron normalmente ningún tipo de muestreo sino sólo su georreferenciación por GPS, asignación del tipo de suelo presente y breve descripción del suelo y de los parámetros ambientales, 154 sondeos, que además de las observaciones anteriores incluyeron toma de muestras y análisis físico-químico de 20 parámetros y 23 perfiles representativos que caracterizan los diferentes suelos existentes en el Parque y que se eligieron como tales a partir de las 359 observaciones anteriores. Estos perfiles se han descrito exhaustivamente, tanto en sus características ambientales como morfológicas. Igualmente se han caracterizado desde el punto de vista morfológico y fisicoquímico cada uno de los horizontes de todos los perfiles.

Luego se llevaron a cabo los análisis de laboratorio en los sondeos y perfiles representativos, realizándose las siguientes determinaciones analíticas: pH_{agua} , pH_{KCl} , carbono orgánico, nitrógeno total, relación C/N, Índice melánico, (P, K, Ca y Mg) asimilables, Na soluble y cambiante, capacidad total de cambio, saturación de bases, textura, arcilla, limo, arena, elementos gruesos, capacidad de retención de agua a 1/3 y 15 bar, agua útil y propiedades ándicas ($\text{Al}_{\text{oxalato}}$, $\text{Fe}_{\text{oxalato}}$, $\text{Si}_{\text{oxalato}}$, retención de P, densidad aparente a 1/3 bar), $\text{Al}_{\text{pirofosfato}}$.

Una vez realizados los análisis se procedió a clasificar cada uno de los 23 perfiles de suelos, usándose para ello la World Referente Base for Soil Resources (WRB 2007).

El último paso lo ha constituido la compilación del mapa final de unidades cartográficas de sue-

los y la carga de la base de datos consistente en una ficha ACCESS para cada uno de los perfiles con enlace al punto de situación georreferenciado de cada perfil en el mapa de situación. En cada ficha se presentan datos de: situación y coordenadas UTM, nombre del perfil, altitud y orientación de la cara del cuerpo edáfico descrita, posición topográfica y pendiente, regímenes hídricos y térmicos, material de origen, vegetación y porcentaje de recubrimiento de la misma, pedregosidad superficial y afloramientos rocosos, profundidad útil, evidencias de erosión, drenaje y permeabilidad, usos e influencia antrópica, secuencia de horizontes, fotografías, etc.

Si bien el cuerpo edáfico es la unidad básica de información e implementación de la cartografía y la base de datos realizada, el objetivo de toda cartografía sigue siendo el de representar la distribución espacial de estas unidades básicas de información. Sin embargo la escala de los mapas o, en muchos casos, la complejidad del territorio a cartografiar, no permite representar los cuerpos edáficos, sino todo lo más agruparlos en unidades cartográficas homogéneas a una determinada escala, que tradicionalmente se han denominado asociaciones de suelos. Se han realizado diversos intentos con el propósito de definir los objetos resultantes de esta asociación y de precisar los criterios utilizados, pero en la mayoría de los casos han fracasado.

Siguiendo el Manual de la Oficina Europea del Suelo (ESB 1999) y la Norma Técnica para la realización de la Cartografía de Suelos a escala 1:50.000 de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo (SANCHEZ DÍAZ *et al.* 2002), a estas agrupaciones lógicas cartografiables nosotros las hemos denominado "edafopaisajes", teniendo también en cuenta que groseramente corresponden al concepto tradicional de unidad cartográfica.

Así queremos dejar claro que la cartografía realizada es un mapa de edafopaisajes, considerando a éstos como una porción de la edafosfera que agrupa cuerpos edáficos que mantienen o mantuvieron relaciones funcionales y no un mapa de suelos convencional, en los que se tiende a re-

presentar unidades taxonómicas puras o todo lo más, las dos edafotaxa principales del recinto en cuestión, con objeto de simplificar, perdiendo así una información que es muy valiosa, sobre todo a la hora de gestionar los recursos.

Para la realización de la distribución y variabilidad espacial de parámetros edáficos relevantes se comenzó con el diseño de una red homogénea de muestreo, según una malla al azar de 1000 x 1000 m en toda la superficie del Parque (Figura 2), con objeto de lograr una representatividad y una cobertura territorial suficiente de modo que se minimicen la introducción de sesgos en el tratamiento de interpolación kriging. Sin embargo y por razones de operatividad, esta malla se adaptó a otra también de 1000 x 1000 m, basada en las existentes en el Parque Nacional para el estudio de la vegetación, lo cual permite tener puntos de información de suelos georreferenciados en los mismos lugares en los que se dispone de datos de la fenología de la vegetación. En total disponemos de un total de 243 puntos a muestrear, de los cuales se han muestreado sólo 173, bien porque muchos de ellos estaban situados sobre materiales rocosos recientes sin existencia de suelo o bien por la práctica inaccesibilidad del mismo.

En cada punto de muestreo (Figura 1) se llevó a cabo una descripción completa de las características del terreno y del horizonte superficial del suelo y un inventario de la vegetación, y se ha recogido una muestra en el horizonte de enraizamiento o capa arable. Este horizonte comprende desde la superficie del suelo hasta una profundidad de 30-40 cm. Esta capa del suelo contiene la mayor parte de las raíces con función asimilatoria (no así las de función de sostén, mucho más profundas), constituyendo el principal referente para determinar la calidad del suelo. También es la capa más sensible a los cambios de uso y posibles procesos de degradación asociados.

Las fichas de campo de los puntos muestreados se cargaron simultáneamente en la base de datos en forma de ficha ACCESS (Figura 2), para cada uno de los muestreos con enlace al punto de situación georreferenciado en el mapa de situación.



Figura 1. Imagen de uno de los puntos de muestreo, que incluye un inventario de la vegetación y una descripción morfológica de las características del terreno y del horizonte superficial del suelo. El muestreo se ha realizado entre 0-30/40 cms.

Figure 1. One of the chosen sampling points.

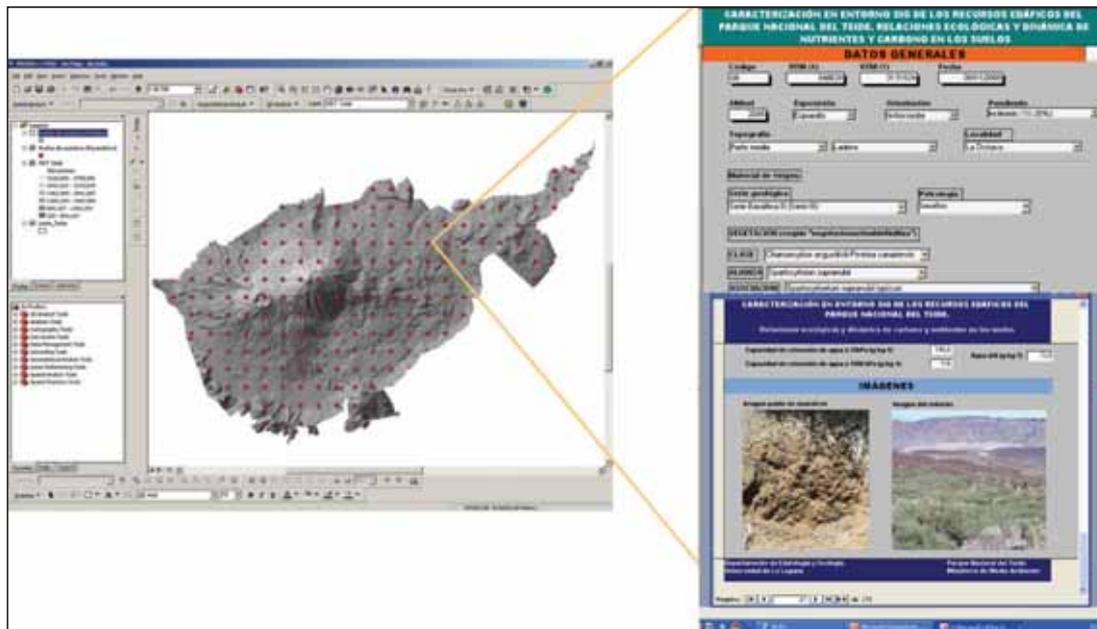


Figura 2. Imagen de la base de datos, en la que se señala la red de puntos de muestreo y una visión de la ficha ACCESS enlazada a cada uno de ellos.

Figure 2. Database file image.

Para los 173 puntos de muestreo se han realizado los correspondientes análisis de laboratorio, llevando a cabo en cada uno de los horizontes descritos las siguientes determinaciones analíticas: pH, carbono orgánico, nutrientes asimilables

(N,P,K,Ca,Mg), textura, densidad aparente a 1/3 bar, pedregosidad, profundidad del suelo, capacidad de retención de agua a capacidad de campo y capacidad de retención de agua utilizable (Figura 3).

Punto paramétrico	Profundidad útil cm	Feo	Alo %	Sio	Alo*1/2 Feo	Ret. P	Fep %	Alp	Sip	C	M.O. g kg ⁻¹	N	C/N
K11	50-100	0,31	0,12	0,32	0,31	37,00	0,02	0,66	0,23	12,48	21,51	0,09	13,16

Punto paramétrico	Profundidad útil cm	C.E (µs/cm)	pH (1:2,5) H ₂ O	KCl	Cationes cambiables (cmolc kg ⁻¹)				SUMA cmolc Kg ⁻¹	CCC	Saturación %
					Ca	Mg	Na	K			
K11	50-100	55,1	5,9	4,7	2,4	0,4	0,2	1,2	4,2	12,2	34,4

Punto paramétrico	Profundidad útil cm	d.a. Mg M ⁻³	Retención de agua (g kg ⁻¹)			Arcilla	Limo	Arena	Textura de campo	Elementos gruesos g kg ⁻¹
			33 kPa	1500 kPa	Agua útil	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹		
K11	50-100	0,94	64,0	12,1	56,6	38,8	150,7	810,5	Areno-limosa	565,8

Figura 3. Datos analíticos de un punto de muestreo, donde Feo, Alo y Sio, significan Fe, Al y Si en forma de compuestos amorfos, Ret.P = retención de fosfato, Fep, Alp y Sip = Fe, Al y Si en forma de complejos organominerales, C = carbono, M.O. = materia orgánica, C/N = relación carbono/nitrógeno, C.E. = conductividad eléctrica, CCC = capacidad de cambio catiónico, d.a. = densidad aparente, kPa = kilopascales.

Figure 3. Analytical data for one sampling point.

Se analizaron y cartografiaron 14 parámetros analíticos de un total de 173 puntos de muestreo y se realizaron 23 mapas. El método de interpolación utilizado ha sido el IDW o Distancias Medias Ponderadas.

En el apartado de relaciones ecológicas, el empleo de diversas técnicas de análisis multivariante de datos: análisis de redundancias (RDA), análisis de la varianza (ANOVA, ANCOVA), análisis de regresión ordinal (PLUM), análisis de correspondencias corregido (DCA), análisis canónico de correspondencias (CCA), análisis de componentes principales (PCA), ha permitido identificar los factores ecológicos relevantes en relación a los gradientes edáficos en el área de estudio. Entre los más significativos se cuentan los climáticos, relacionados con la altitud, la orientación y la exposición a los vientos dominantes, la topografía y pendiente del terreno y, muy particularmente, el material de origen del suelo, cuya influencia resulta especialmente importante en los suelos en las primeras etapas de su formación (coladas de lavas, piroclastos basálticos y sálicos, depósitos aluviales-coluviales, etc).

Igualmente, hemos podido identificar las propiedades características de los suelos que sustentan las principales unidades de vegetación en el área: pinar canario y pinares marginales, retamares típicos o enriquecidos en hierba pajonera, formaciones pluriespecíficas y comunidades dominadas por el rosalito de cumbre, así como el efecto que

sobre las propiedades del suelo tuvieron las actuaciones de plantaciones de pino canario llevadas a cabo en épocas pasadas en el entorno del Parque.

Por lo que se refiere al objetivo de establecer el balance de nutrientes y carbono ligados a la materia orgánica del suelo, hemos comenzado por establecer tres parcelas de 25 x 25 m en los tres tipos de vegetación más característicos del Parque Nacional: retamar (*Spartocytisetum supranubii* subsp. *descourainetosum bourgeauanae*), matorral de rosalito (*Erysimo scoparii*-*Pterocphaletum lasiospermi typicum*) y pinar (*Sideritido solutae*-*Pinetum canariensis typicum*). En cada parcela se tomaron muestras durante dos años, en los meses de marzo, julio y noviembre, para cubrir tres etapas fenológicas del desarrollo de la vegetación, de: Fitomasa (tejidos foliares y lignificados), Hojarasca (restos vegetales recién incorporados al suelo) + Mantillo (restos vegetales en descomposición) y horizonte edáfico de incorporación de la materia orgánica al suelo. En cada parcela se señalaron 4 cuadrículas de 1 m² y se realizó un barrido de la hojarasca y el mantillo tres meses antes del comienzo del muestreo. De esta manera se recogió la hojarasca caída correspondiente a cada estación, directamente de las cuadrículas.

Paralelamente, en cada parcela acotada se midió:

- Desfronde de la vegetación: magnitud y periodicidad de la caída del material vegetal mediante cuadrículas, y composición del desfron-

de en cuanto a proporciones relativas de tejidos fotosintéticos y de sostén

- Emisiones (flujos) de CO₂ a partir del suelo por mineralización de la materia orgánica, mediante "trampas de sosa".

Este método consiste en medir el CO₂ desprendido del suelo procedente de la respiración de los microorganismos, la macrofauna y las raíces de las plantas. Para ello se colocan cámaras invertidas de acero inoxidable sobre la superficie del suelo introduciendo sus bordes en el mismo unos 2 cm, procurando alterar lo menos posible la estructura del suelo. Las dimensiones de estas cámaras son de 22 cm de lado × 30 cm de alto. En el interior de cada cámara se coloca un frasco con 50 ml de NaOH 0.2N, sobre un trípode que disminuye la superficie de contacto del frasco con el suelo. Cada muestra se realiza por triplicado y se coloca además un blanco, el cual consiste en una cámara con tapa hermética de dimensiones 22× 22× 28 cm. Una vez instaladas las cámaras se dejan durante 24 horas. Transcurrido este tiempo, se retiran las cámaras y se recogen los frascos de NaOH para su análisis en laboratorio. Este método se conoce comúnmente como trampa de sosa.

En el laboratorio se analizaron en la fitomasa y en el compartimento hojarasca + mantillo los contenidos totales de C, N, P, S, Ca, Mg, Na, K, Fe, Al, Mn, Zn, B. Con el fin de conocer el papel de los microorganismos del suelo en el reciclaje de nutrientes y dinámica del carbono, se recogieron con la misma periodicidad muestras de los horizontes superficiales del suelo específicas para análisis biológicos, en particular de aquellos parámetros más directamente relacionadas con la cantidad y vitalidad de la microbiota del suelo y su actividad de mineralización y transformación de componentes orgánicos. En particular:

- * Actividad respiratoria en incubación y flujo de CO₂
- * Actividad de las enzimas asociadas al ciclo del carbono (celulasa, deshidrogenasa y β-D-glucosidasa) del nitrógeno (ureasa) y del fósforo (fosfomonoesterasa), y

- * Diversas formas de carbono orgánico del suelo (C-asociado a la biomasa y carbono lábil).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cartografía digital detallada de la distribución de los principales unidades cartográficas de suelos en el Parque Nacional con su correspondiente base de datos

En la Figura 4 se muestra la distribución espacial de las diferentes unidades y subunidades de suelos.

En la Figura 5 se puede observar la cartografía de unidades de suelos del Parque Nacional del Teide

Un ejemplo de la ficha ACCESS correspondiente a cada unidad cartográfica o edafopaisaje se muestra en la Figura 6.

En la Figura 7 se muestran dos ejemplos de algunos de los 33 edafopaisajes (unidades cartográficas) identificados en el Parque Nacional

Se han identificado 33 unidades cartográficas; a saber: leptosoles líticos, leptosoles vítricos, leptosoles úmbricos, leptosoles háplicos, leptosoles líticos - andosoles lépticos, leptosoles líticos - andosoles vítricos, leptosoles vítricos - andosoles vítricos, leptosoles háplicos - andosoles lépticos, leptosoles háplicos - afloramientos basálticos, leptosoles háplicos - afloramientos traquibasálticos, leptosoles ándicos - andosoles lépticos, fluviosoles háplicos, andosoles vítricos, andosoles lépticos, andosoles vítricos - andosoles lépticos, andosoles vítricos - leptosoles vítricos, andosoles vítricos - regosoles háplicos, andosoles vítricos - afloramientos sálicos, andosoles lépticos-andosoles vítricos, cambisoles lépticos, cambisoles háplicos, cambisoles lépticos - leptosoles vítricos, cambisoles lépticos - leptosoles háplicos, regosoles colúvicos, regosoles háplicos, regosoles háplicos - leptosoles vítricos, regosoles háplicos - leptosoles háplicos, regosoles háplicos - andosoles vítricos, regosoles háplicos - afloramientos basálticos

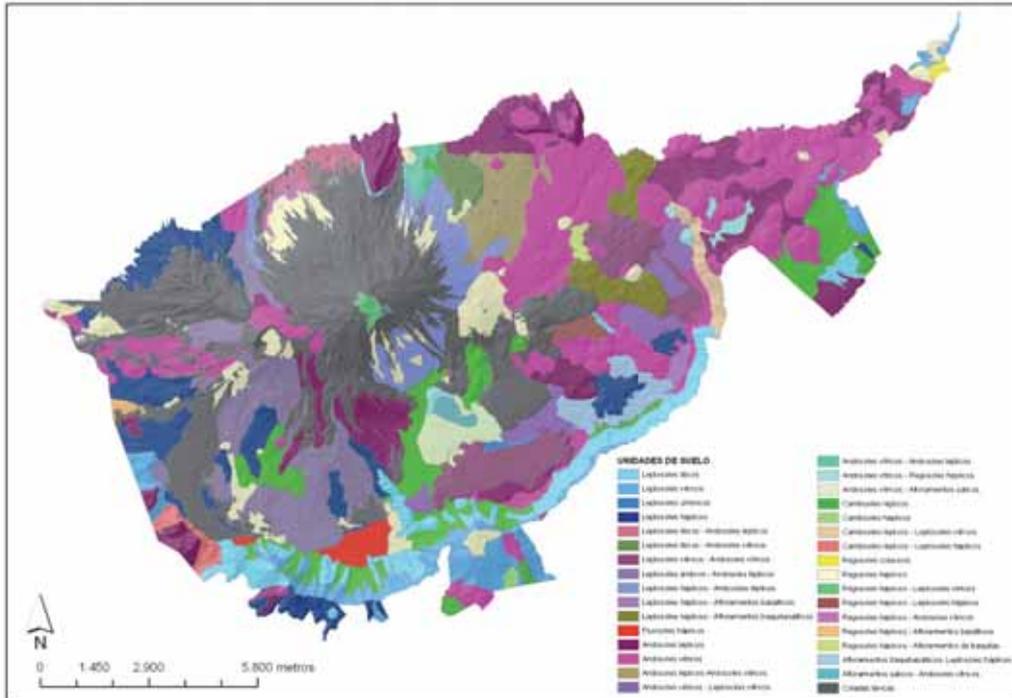


Figura 4. Cartografía de unidades y subunidades de suelos (unidades cartográficas). Se representan las unidades cartografiadas de los principales tipos de suelos a nivel de subunidad FAO y su distribución espacial.

Figure 4. Soil units and subunits map (cartographic units).

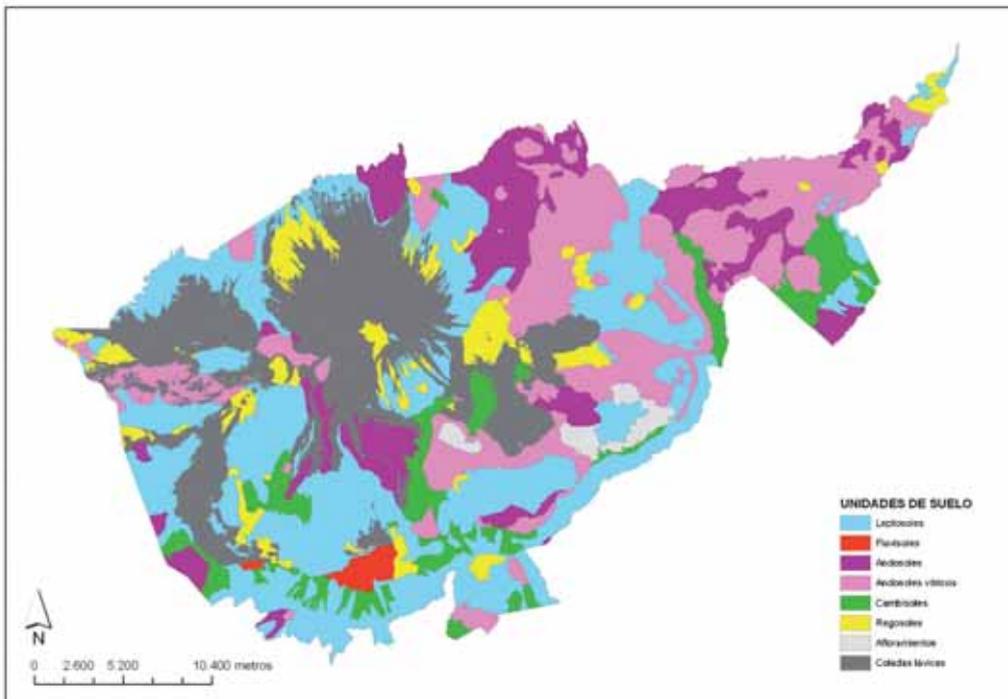


Figura 5. Cartografía de unidades de suelos, en la que se observa el predominio de leptosoles, seguidos de andosoles vítricos, andosoles háplicos, cambisoles y regosoles.

Figure 5. Soil units map.

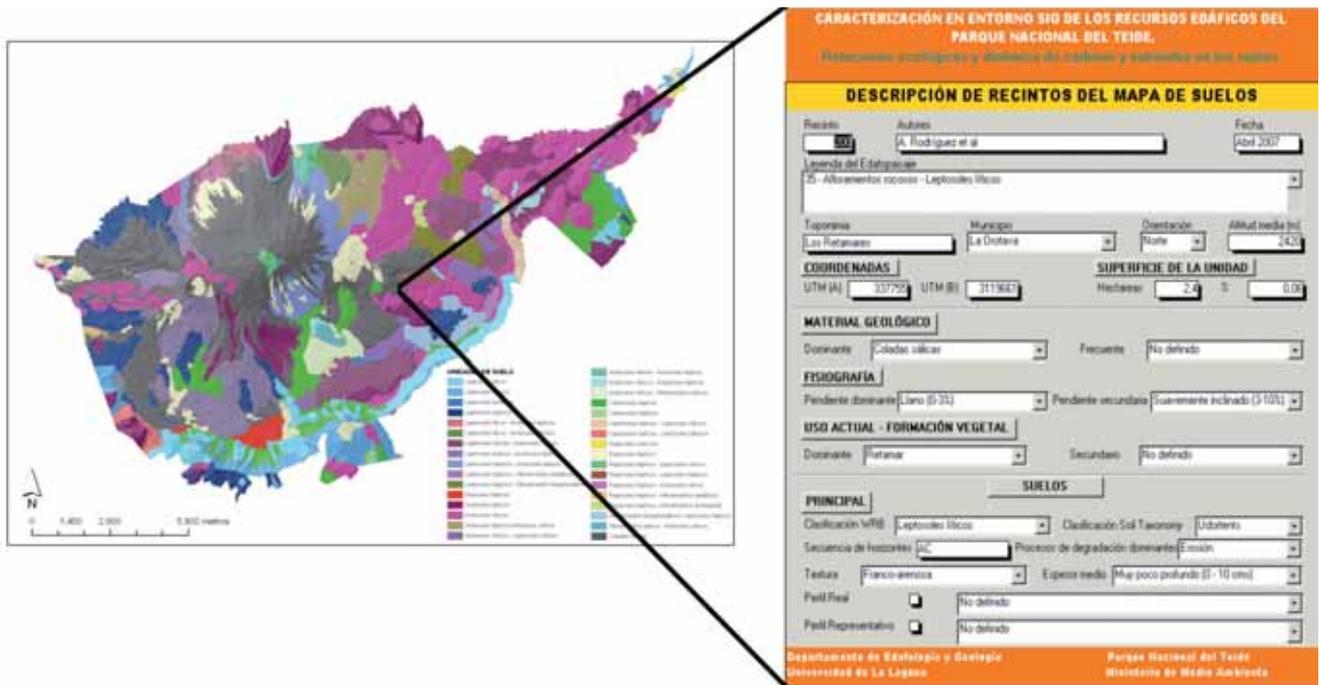


Figura 6. Mapa de suelos del Parque Nacional del Teide con un ejemplo de la ficha ACCESS correspondiente al edafopaisaje 35 (afloramientos rocosos-leptosoles líticos).

Figure 6. Soil map of the Teide National Park with an associated database record.

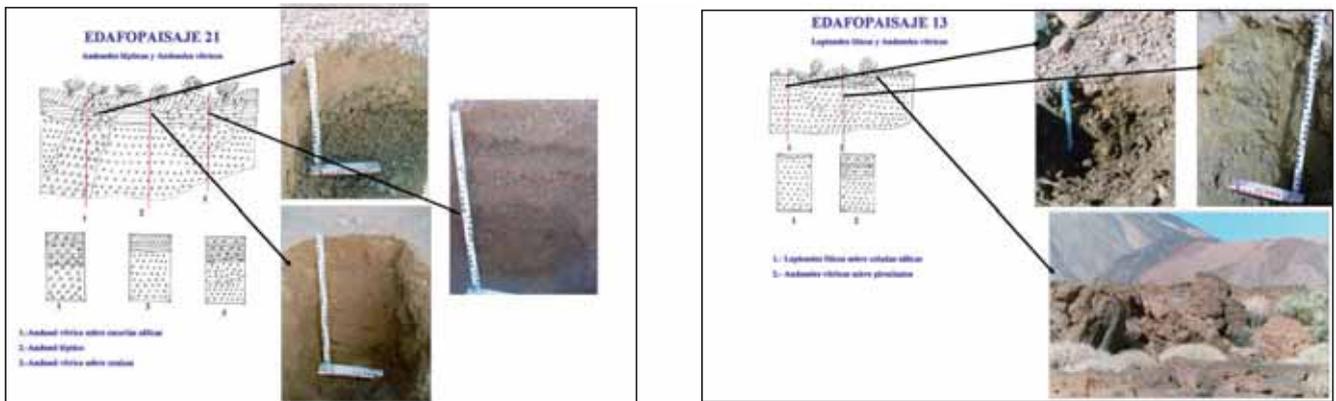


Figura 7. Dos ejemplos de edafopaisajes, en los que se puede observar las relaciones topográficas entre las unidades taxonómicas existentes en la unidad cartográfica.

Figure 7. Two examples of soil landscapes (soilsapes).

Y 11 unidades taxonómicas: leptosoles líticos, leptosoles vítricos, leptosoles úmbricos, leptosoles háplicos, leptosoles ándicos, andosoles lépticos, andosoles vítricos, fluvisoles háplicos, regosoles háplicos, regosoles colúvicos, cambisoles lépticos y cambisoles háplicos, además de diversos afloramientos de coladas lávicas de diferente naturaleza.

Lógicamente los suelos más abundantes son los leptosoles o suelos minerales brutos (litosuelos, protosuelos) (5.849 has) como corresponde a un territorio joven y en continuo rejuvenecimiento, bien por las erupciones volcánicas o por los derrumbios de ladera que son frecuentes en el Parque (Figura 8). Por la misma razón, los materiales sin o con muy poca alteración (coladas lávicas), ocupan

también una extensión considerable en el Parque Nacional (4.011 has). Los suelos muy poco evolucionados, tales como los andosoles vítricos (Figura 9), que aún retienen propiedades muy próximas al material de origen, también ocupan una superficie importante en este espacio (3.816 has).



Figura 8. Leptosol háplico.

Figure 8. Haplic Leptosol.



Figura 9. Andosol vítrico.

Figure 9. Vitric Andosol.

Los andosoles son los suelos más evolucionados que aparecen en el Parque; estos suelos son los más característicos del espacio natural (junto a los andosoles vítricos) y aparecen sobre los materiales geológicos más antiguos (dentro de su juventud) del Parque (2.194 has).

Los cambisoles (1.387 has) son suelos de escasa representación en el Parque, allí donde las características ándicas de los suelos se han perdido. Los regosoles o materiales piroclásticos sin apenas alteración ocupan también una cierta extensión en el Parque Nacional, sobre todo en las áreas más recientes (1.157 has). Los afloramientos rocosos, como consecuencia de la erosión hídrica y eólica son también frecuentes (269 has). Finalmente los fluvisoles (149 has) o suelos de aporte aluvial sólo aparecen en el paraje conocido como Llano de Ucanca, un valle sedimentario muy característico en Las Cañadas del Teide.

Distribución y variabilidad espacial de los parámetros edáficos más relevantes con su correspondiente base de datos

Los resultados más relevantes de este apartado son los siguientes:

Se observa que los contenidos en C orgánico y N total son muy bajos (Figuras 10 y 11), tanto en peso (gkg^{-1}), como en superficie (kgm^{-2}), por lo que se valora que los suelos del Parque tienen aún una alta capacidad de secuestro de CO_2 atmosférico. Los contenidos de carbono orgánico son inferiores a 11 kgm^{-2} (Figura 12) en la mayor parte del territorio del Parque y los de nitrógeno total están casi siempre por debajo de los 3 gkg^{-1} , de tal manera que la relación carbono/nitrógeno está siempre comprendida entre 12 y 15, lo cual indica una buena mineralización de la materia orgánica en estos suelos (Figura 13).

Se observa una buena correlación ($R^2=0.85$), como es lógico, entre el carbono orgánico y el nitrógeno total (Figura 14), puesto que este último se encuentra en su mayor parte también contenido en la materia orgánica.

No se observa sin embargo, ninguna correlación ($R^2=0.00$) entre el carbono orgánico y el conte-

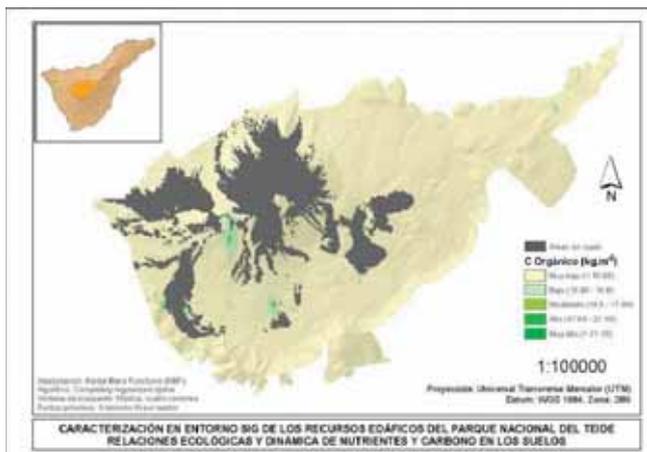


Figura 10. Mapa de distribución del carbono orgánico en el que se observa valores inferiores a 11 kgm⁻².

Figure 10. Soil organic C distribution map.

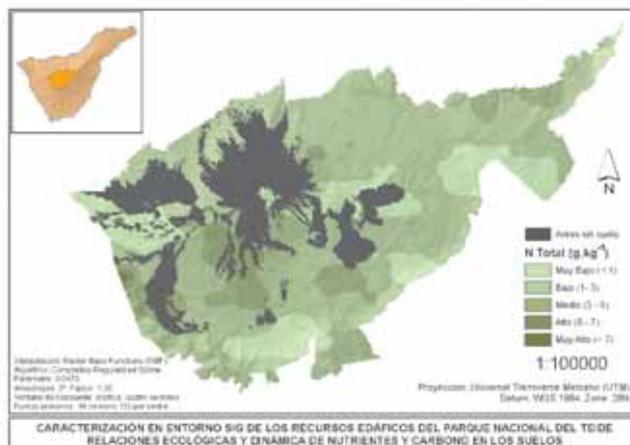


Figura 11. Mapa de distribución del nitrógeno total con contenidos inferiores a 3 gkg⁻¹.

Figure 11. Total soil N distribution map.

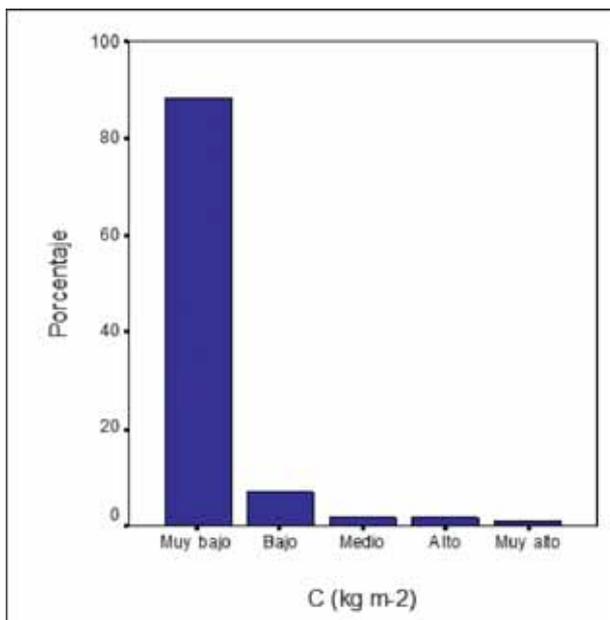


Figura 12. Valores muy bajos de carbono orgánico en su histograma de distribución

Figure 12. Organic C distribution histogram.

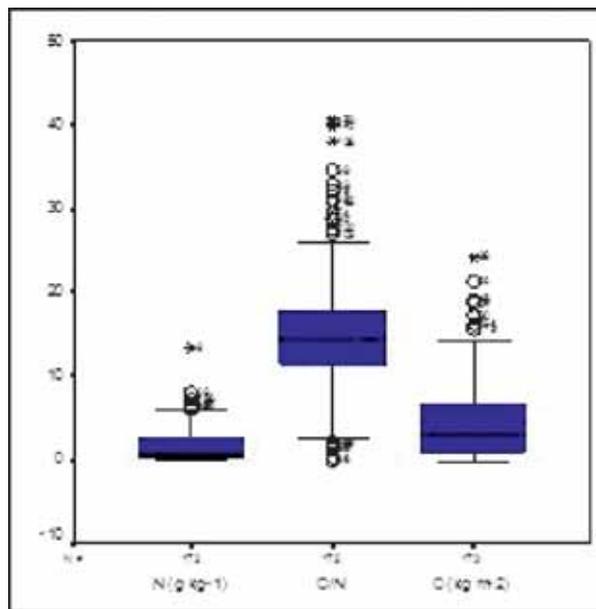


Fig.13. Nitrógeno total, carbono orgánico y relación C/N, indicando una buena mineralización de la materia orgánica.

Figure 13. Total N, organic C and C/N ratio.

nido de calcio (Figura 15), como es habitual en otros suelos más evolucionados, en los que la acumulación de carbono se relaciona con el calcio disponible para los microorganismos del suelo.

Igualmente baja es la correlación entre el carbono orgánico y la cantidad de arcilla ($R^2=0.02$) (Figura 16), probablemente debido a los bajos contenidos de arcilla en estos suelos. Habitualmente en los

suelos más maduros y arcillosos, ésta favorece la acumulación de carbono.

El pH es ácido en la mayor parte de los suelos del Parque (pH = 5,5-6,5), como corresponde a suelos jóvenes y extremadamente lixiviados de cationes básicos (Figuras 17a y 17b).

Los valores de pH en estos suelos correlacionan mejor con el contenido en magnesio ($R^2=0,11$) (Fi-

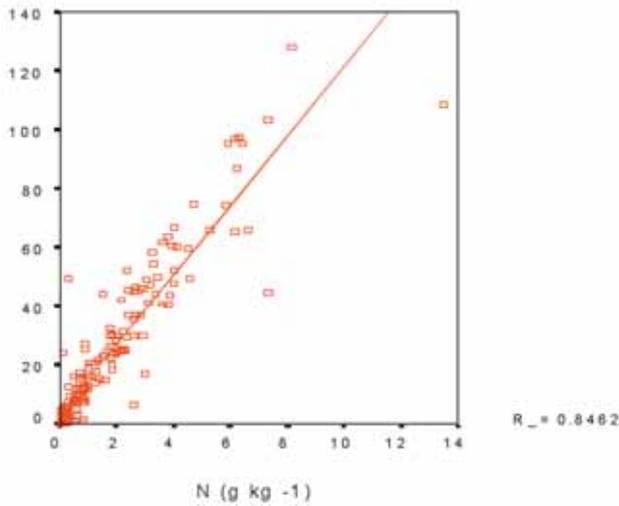


Figura 14. Buena correlación entre el carbono orgánico y el nitrógeno total, ya que este último está en su mayor parte contenido en la materia orgánica asociado al carbono orgánico.

Figure 14. Correlation between organic C and Total N.

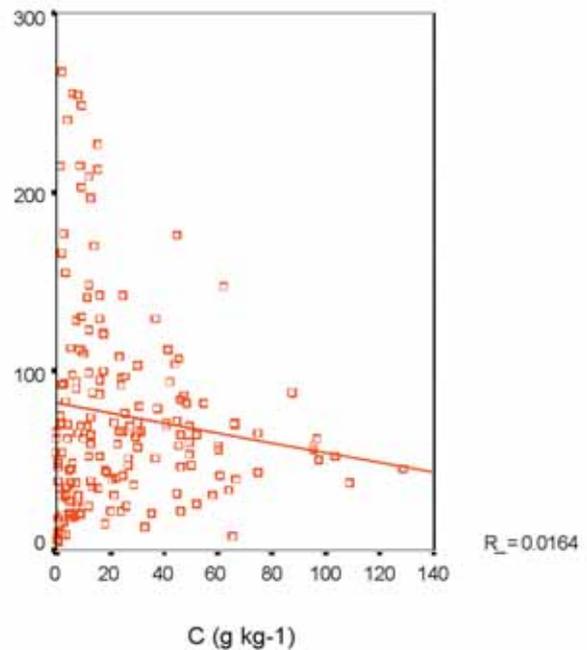


Figura 16. Baja correlación entre el carbono orgánico y el contenido en arcilla, debido al bajo contenido de arcilla de estos suelos, ya que la arcilla favorece la acumulación de carbono orgánico.

Figure 16. Correlation between organic C and clay content.

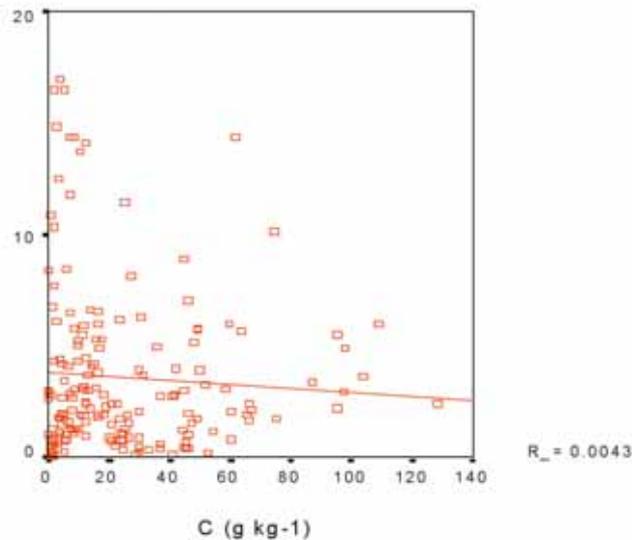


Figura 15. Baja correlación entre el carbono orgánico y el calcio asimilable, como corresponde a suelos jóvenes y poco evolucionados.

Figure 15. Correlation between organic C and available Ca.

gura 19) que con el de calcio ($R^2=0,07$) (Figura 18), como corresponde a suelos jóvenes poco alterados y donde predomina el pH de abrasión.

Los niveles de fósforo, calcio y magnesio asimilables en el suelo son muy bajos, en relación con la acidez de los mismos, lo que puede significar deficiencias nutricionales en estos elementos para la vegetación no adaptada (Figuras 20, 21 y

22). La correlación entre el calcio y el magnesio es alta ($R^2=0,76$), como corresponde a materiales geológicos en proceso de alteración (Figura 23).

Los niveles de potasio asimilable son muy bajos en la mayor parte del Parque Nacional (Figuras 24a y 24b), lo cual puede originar deficiencias en la vegetación, aunque en determinadas situaciones, como es el borde de la caldera de Las Cañadas, son muy altos, lo cual se relaciona con la presencia de piroclastos ácidos (pumitas), con un fondo vítrico de naturaleza feldespática y por tanto rico en potasio, cuya alteración libera altas cantidades de potasio.

Niveles bajos a moderados de sodio en todos los suelos (Figuras 25a y 25b). Los niveles más altos se encuentran en aquellas áreas donde predominan los materiales pumíticos de naturaleza feldespática (plagioclásica) (borde Sur de Las Cañadas), cuya alteración libera una importante cantidad de sodio.

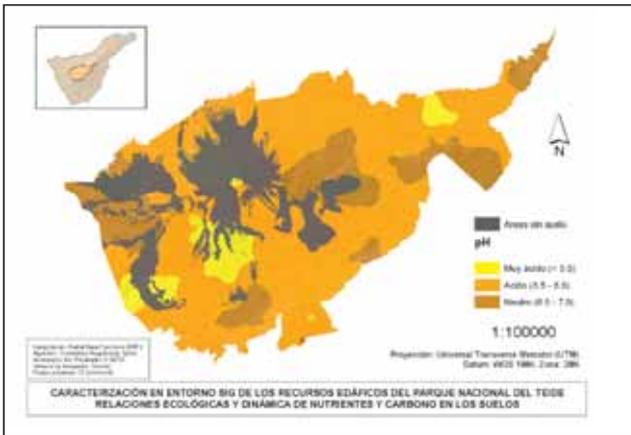


Figura 17a. Distribución espacial de los valores de pH, donde se observa que los pH neutros se distribuyen en el entorno de los afloramientos rocosos.

Figure 17a. Spatial distribution of soil pH values.

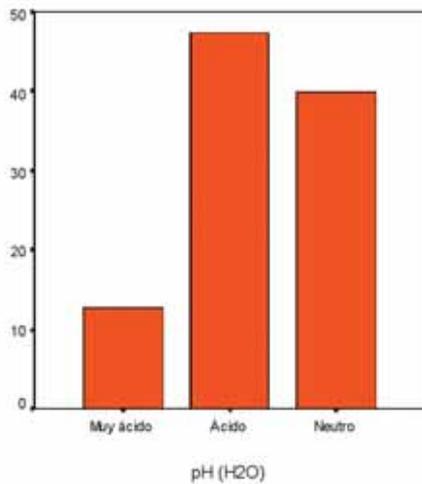


Figura 17b. Distribución de frecuencias del valor de pH con predominio de los suelos ácidos y neutros.

Figure 17b. Histogram of soil pH values.

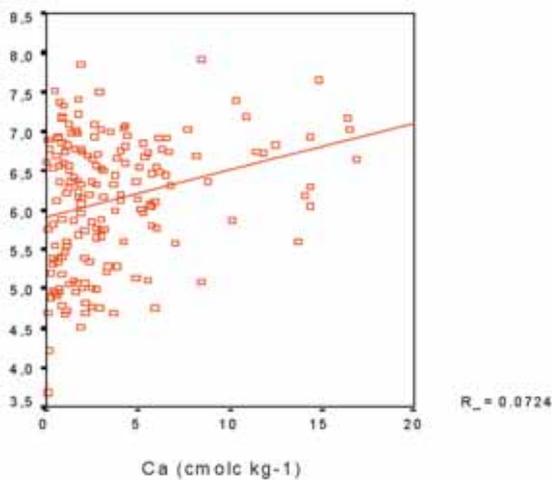


Figura 18. Correlación entre el pH y el contenido en calcio.

Figure 18. Correlation between soil pH and available Ca.

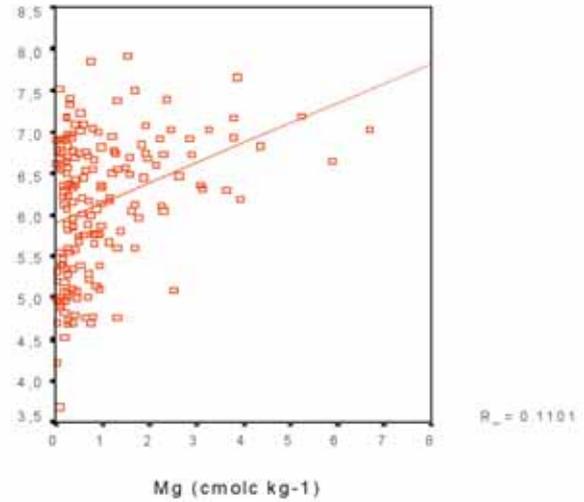


Figura 19. Mejor correlación entre el pH y el contenido en magnesio, como corresponde a suelos jóvenes en los que predomina el pH de abrasión.

Figure 19. Correlation between soil pH and available.

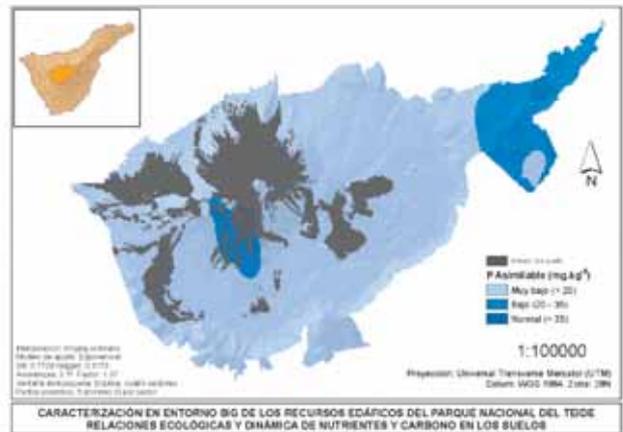


Figura 20. Distribución espacial del fósforo asimilable.

Figure 20. Spatial distribution of available P.

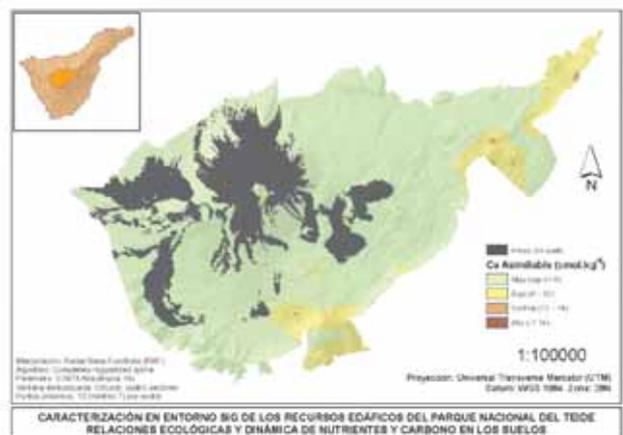


Figura 21. Distribución espacial del calcio asimilable.

Figure 21. Spatial distribution of available Ca.

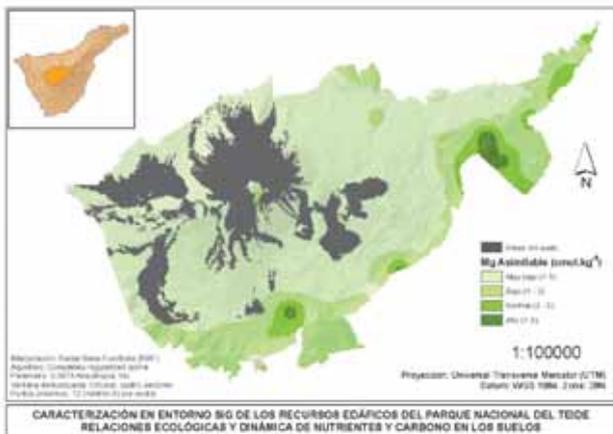


Figura 22. Distribución espacial del magnesio asimilable.
 Figure 22. Spatial distribution of available Mg.

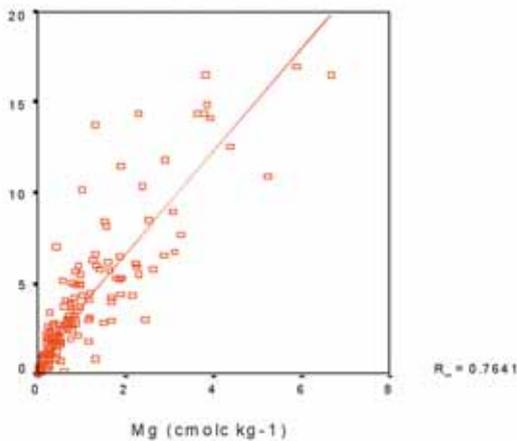


Figura 23. Alta correlación entre el contenido en calcio y en magnesio, como corresponde a materiales en proceso de alteración.
 Figure 23. Correlation analysis: available Ca vs Mg.

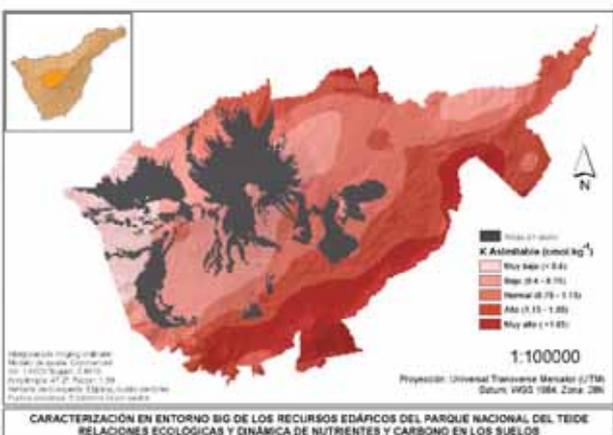


Figura 24a. Distribución espacial del potasio asimilable, observándose el contenido más alto en los bordes de la caldera de Las Cañadas.
 Figure 24a. Spatial distribution of available K.

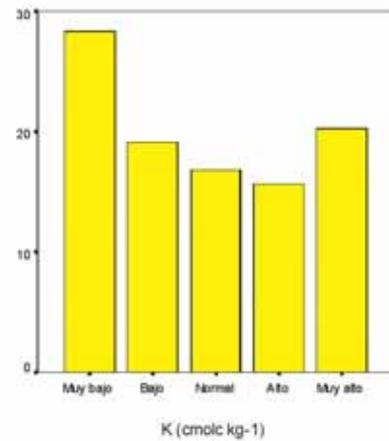


Figura 24b. Distribución de frecuencias del contenido en potasio de los suelos.
 Figure 24b. Frequency distribution for soil K contents.

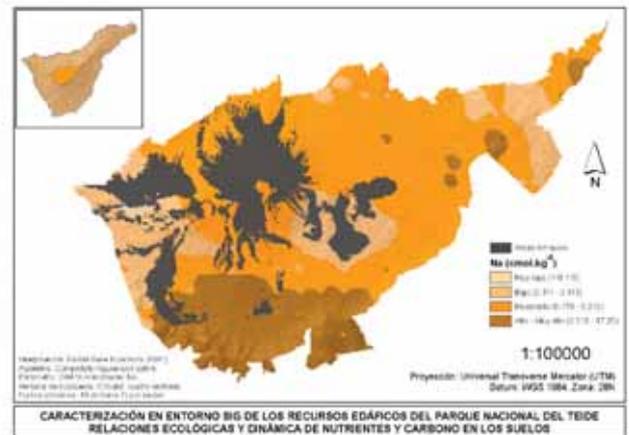


Figura 25a. Distribución espacial del sodio en los suelos, en la que se observa unos valores más altos en el borde Sur de Las Cañadas.
 Figure 25a. Spatial distribution of Na in soils.

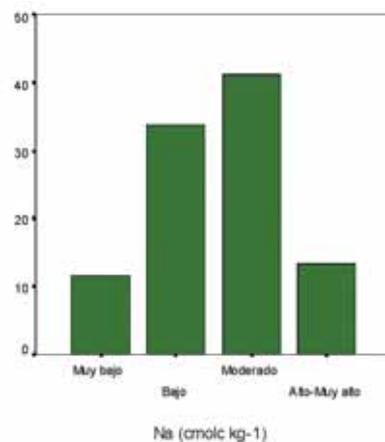


Figura 25b. Distribución de frecuencias del contenido en sodio de los suelos.
 Figure 25b. Frequency distribution for soil Na contents.

Muy altos contenidos en arenas en todos los suelos (Figura 26) y bajos contenidos en arcillas (Figura 27), como corresponde a suelos jóvenes y desarrollados en su mayoría a partir de materiales piroclásticos.

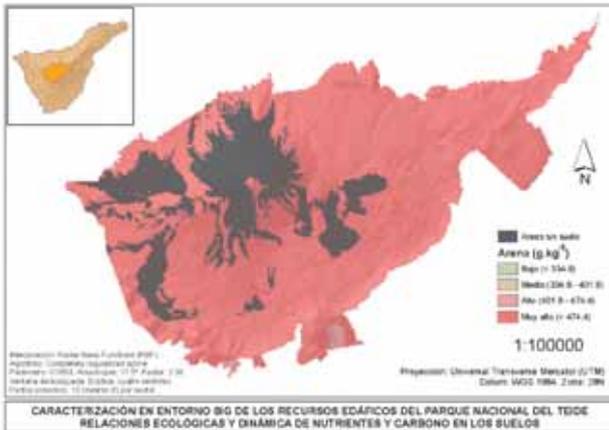


Figura 26. Distribución espacial del contenido en arenas de los suelos del Parque, señalando el alto contenido de las mismas.

Figure 26. Soil sand content distribution at the Teide National Park.

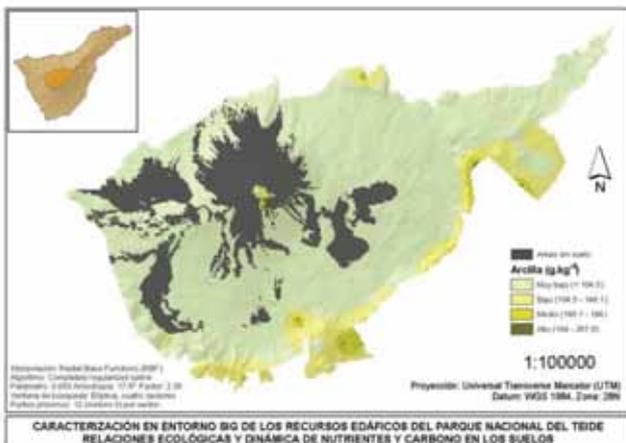


Figura 27. Distribución espacial del contenido en arcilla de los suelos. Valores muy bajos, como corresponde a suelos jóvenes y poco evolucionados.

Figure 27. Soil clay content distribution at the Teide National Park.

En consecuencia, la textura es francoarenosa y con abundante pedregosidad, derivada de las características del material de origen (Figuras 28, 29 y 30).

A causa de las texturas gruesas en todos los suelos, los valores de la capacidad de retención de

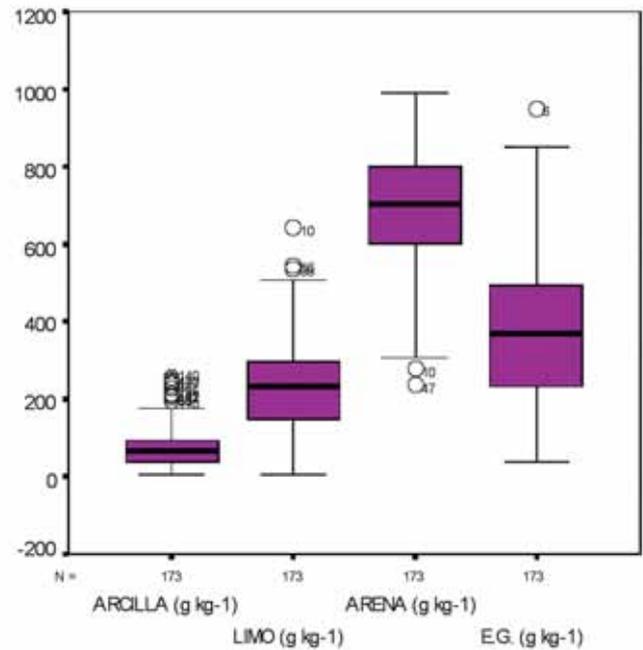


Figura 28. Diagrama de cajas para arcilla, limo, arena y elementos gruesos (E.G.= pedregosidad)

Figure 28. Clay, silt sand and coarse elements.

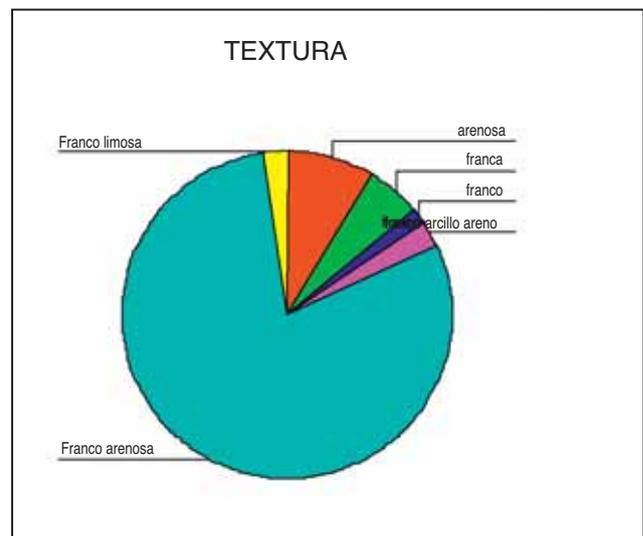


Figura 29 Diagrama circular con la distribución de frecuencias de los principales tipos texturales, predominando la textura franco-arenosa.

Figure 29. Frequency distribution for the main texture types.

agua son moderados a muy bajos, tal como se observa en las Figuras 31 y 32.

Igualmente a causa del bajo contenido en fracción fina de los suelos y consecuentemente en microporosidad, las reservas de agua utilizable

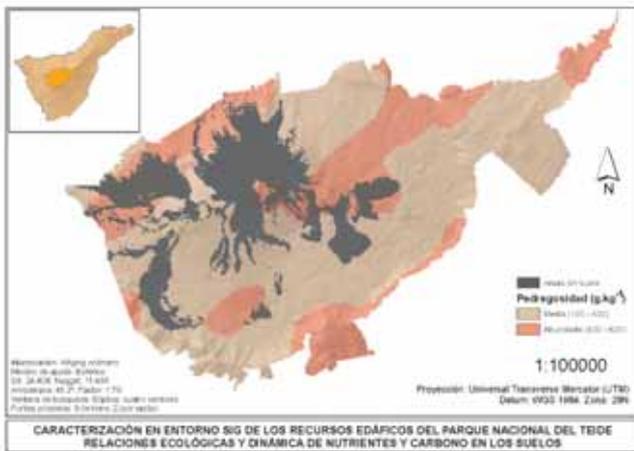


Figura 30. Distribución espacial de la pedregosidad.

Figure 30. Spatial distribution of stoniness.

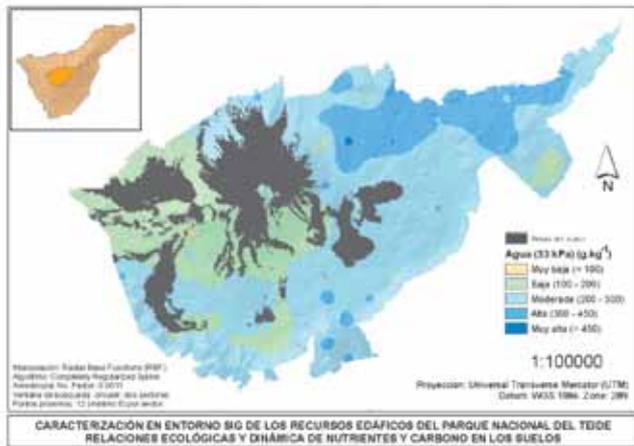


Figura 31 Distribución espacial de la capacidad de retención de agua a capacidad de campo.

Figure 31. Spatial distribution of soil moisture retention at field capacity.

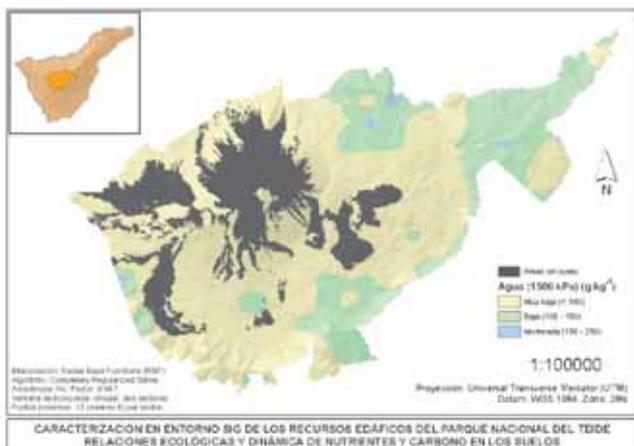


Figura 32. Distribución espacial de la capacidad de agua en el punto de marchitamiento.

Figure 32. Spatial distribution of soil moisture retention at wilting point.

por la vegetación son sólo moderadas (Figuras 33 y 34).

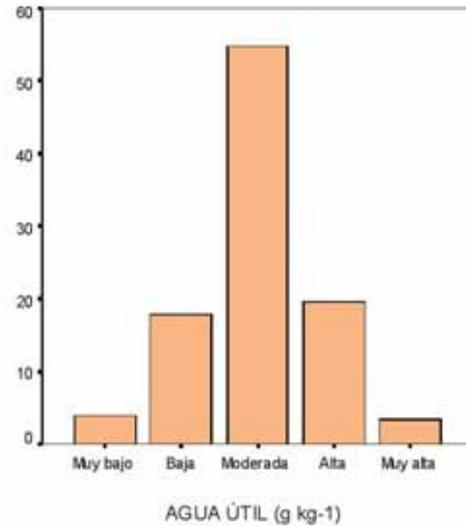


Figura 33. Moderadas cantidades de agua utilizable por la vegetación, según la distribución de frecuencias.

Figure 33. Frequency distribution for the effective water holding capacity.

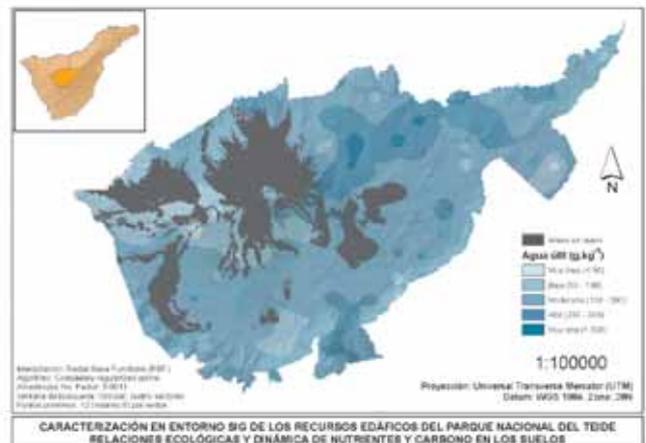


Figura 34. Distribución espacial de la capacidad de retención de agua útil.

Figure 34. Spatial distribution of the effective water holding capacity.

Relaciones ecológicas entre diferentes parámetros edáficos y otras variables ambientales

En este apartado el empleo de diversas técnicas de análisis multivariante de datos: análisis de redundancias (RDA), análisis de la varianza (ANOVA, ANCOVA), análisis de regresión ordinal (PLUM), análisis de correspondencias corre-

gido (DCA), análisis canónico de correspondencias (CCA), análisis de componentes principales (PCA), ha permitido identificar los factores ecológicos relevantes en relación a los gradientes edáficos en el área de estudio. Entre los más significativos se cuentan los climáticos, relacionados con la altitud, la orientación y la exposición a los vientos dominantes, la topografía y pendiente del terreno y, muy particularmente, el material de origen del suelo, cuya influencia resulta especialmente importante en los suelos en las primeras etapas de su formación (coladas de lavas, piroclastos basálticos y sálicos, depósitos aluviales-coluviales, etc) (Figura 35).

Igualmente, hemos podido identificar las propiedades características de los suelos que sustentan las principales unidades de vegetación en el área: pinar canario y pinares marginales, retamares típicos o enriquecidos en hierba pajonera, formaciones pluriespecíficas y comunidades dominadas por el rosadillo de cumbre, así como el efecto que sobre las propiedades del suelo tuvieron las actuaciones de plantaciones de pino canario llevadas a cabo en épocas pasadas en el entorno del Parque.

Se observa que al ascender en altitud, el clima se vuelve más riguroso y en consecuencia los suelos son cada vez más pobres en materia orgánica, nitrógeno y fósforo asimilable. También disminuye el contenido de elementos finos como consecuencia de la incidencia del viento y de la erosión eólica y el carácter ándico de los suelos a consecuencia de las características de la vegetación con sistemas radiculares menos desarrollados y de menor vitalidad y por tanto con menor aporte orgánico al suelo, lo cual hace que los mismos presenten una mayor densidad aparente.

La orientación también tiene una cierta influencia en las propiedades edáficas, ya que se aprecia que en orientación suroeste disminuye el contenido de nitrógeno, sodio, elementos finos y microporosidad y en consecuencia la capacidad de retención de agua, con respecto a aquellos suelos orientados al noreste, como consecuencia creemos de una menor actividad de la vegetación en las orientaciones sur.

En lo que se refiere a la topografía la mayor pendiente se asocia siempre a los suelos más afectados por procesos de erosión laminar y en regueros, más pedregosos y carentes de elementos finos y con menor espesor y por lo tanto con menor capacidad de almacenamiento de agua.

Los suelos desarrollados sobre materiales lávicos presentan una elevada pedregosidad asociada a valores relativamente altos de materia orgánica y nitrógeno y una reacción más ácida. Todo ello parece indicar un régimen hídrico más favorable en los suelos desarrollados sobre estos materiales, resultado del efecto favorable que la pedregosidad tiene sobre la distribución de las precipitaciones sobre la superficie del suelo e infiltración en el mismo.

Los materiales basálticos presentan contenidos significativamente superiores de fósforo asimilable, en relación con su mayor contenido de apatito. En suelos poco evolucionados como los que caracterizan el Parque Nacional del Teide, la fuente principal de fosfato suele ser el mineral apatito, que es más abundante en las rocas basálticas que en las sálicas. Sobre coladas fonolíticas, en el borde y laderas de la caldera, los suelos son más ricos en arcillas y en nutrientes como el calcio y el magnesio, mientras que sobre piroclastos sálicos los suelos son más amarillos y brillantes, con estructura poco desarrollada y de escasa cohesión.

Los suelos desarrollados sobre depósitos de ladera son significativamente más compactos, con abundantes gravas, alto contenido de sodio y magnesio y de escasa microporosidad y por tanto de baja capacidad de retención de agua (Figura 35).

En el análisis de correspondencias corregido (DCA) (Figura 36), el eje I refleja la transición entre sitios con vegetación y sitios desprovistos de ella y el eje II representa la variación que se produce entre retamares oligoespecíficos y plantaciones de pinar, pasando por retamares pluriespecíficos y pinares naturales.

En general, la correspondencia entre la vegetación de las cuadrículas y la descripción realizada

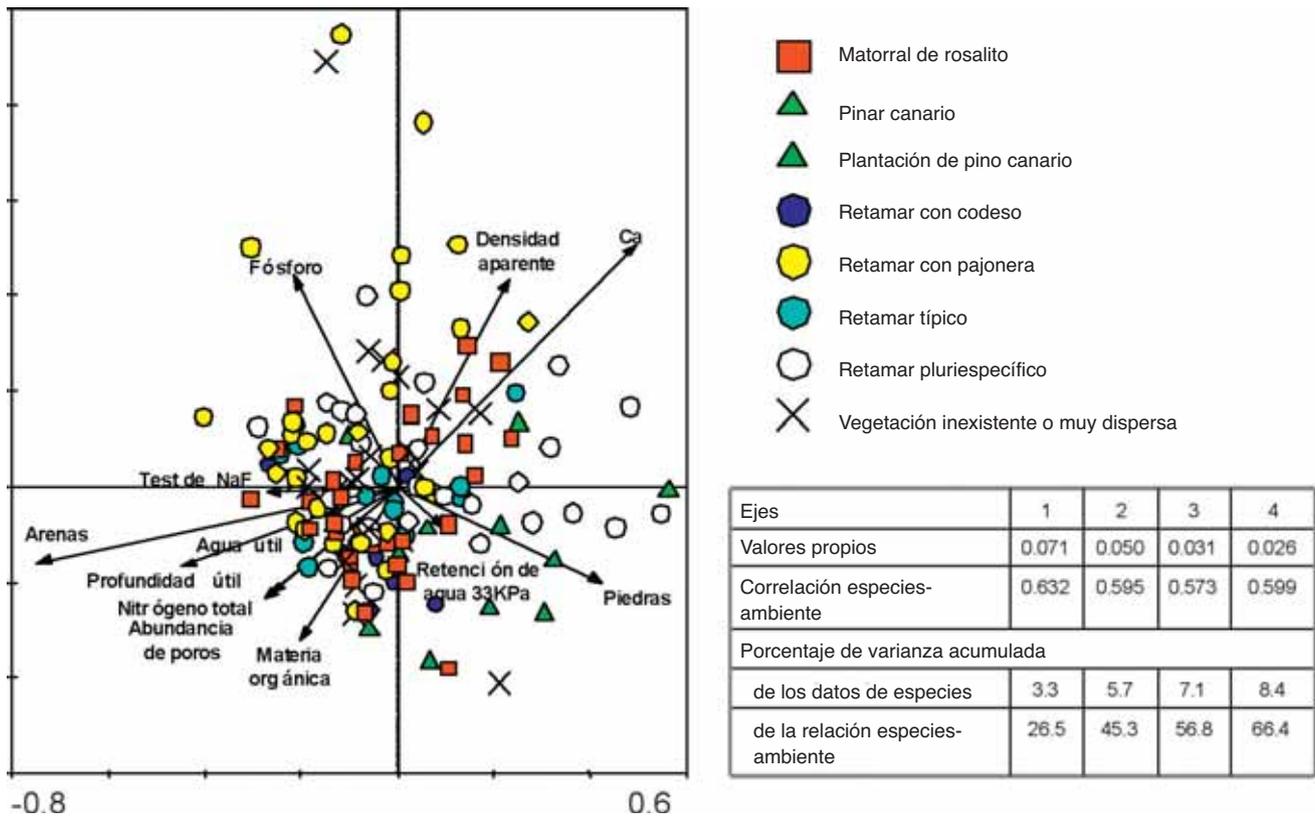


Figura 37. Análisis canónico de correspondencias (CCA). Bajo cobertura vegetal muy dispersa: suelos jóvenes y muy poco evolucionados, con abundantes pedregosidad y estructura particular o en agregados pequeños y de baja cohesión. La vegetación de pinar da lugar a suelos ricos en materia orgánica y nitrógeno y de baja densidad. Los suelos que sustentan el matorral de rosalito son suelos líticos y con numerosos afloramientos rocosos. El retamar origina suelos menos pedregosos y con mayor contenido en fósforo, que otros suelos del entorno.

Figure 37. Canonical correspondence analysis (CCA).

Bajo pinares naturales o plantados: suelos poco densos, ricos en materia orgánica y nitrógeno, asociados al gran porte de la vegetación, elevada producción de hojarasca y unos sistemas radiculares de gran desarrollo.

Bajo matorrales de rosalito de cumbre: los suelos que aparecen son típicamente suelos líticos, con abundancia de afloramientos rocosos.

Bajo retamar: los suelos bajo retamar son significativamente más ricos en fósforo y más pobres en elementos gruesos que otros suelos del Parque; entre ellos, las facies con codeso presentan unas propiedades edáficas más desfavorables (profundidad limitada, retención de agua limitada, contenidos bajos en nutrientes catiónicos, pH más ácido) que las comunidades de retamar monoespecífico o enriquecido en hierba pajonera.

Los pinares constituyen comunidades fuertemente discordantes en el entorno de la alta montaña y a menudo desarrollados sobre suelos de génesis antigua, con procesos edafogénicos muy diferentes de los reinantes en el interior de la Caldera. Por esta razón, procedimos a realizar un segundo CCA (Figura 38), esta vez excluyendo del mismo a los pinares.

Entre los resultados del mismo destacamos que los retamares con hierba pajonera son las comunidades conspicuamente condicionadas por los suelos sobre los que se desarrollan: arenosos poco pedregosos, bien drenados, de carácter ándico y relativamente ricos en nitrógeno.

Según el análisis de componentes principales (PCA) (Figura 39), el primer eje de variación muestra su mayor correlación con parámetros relacio-

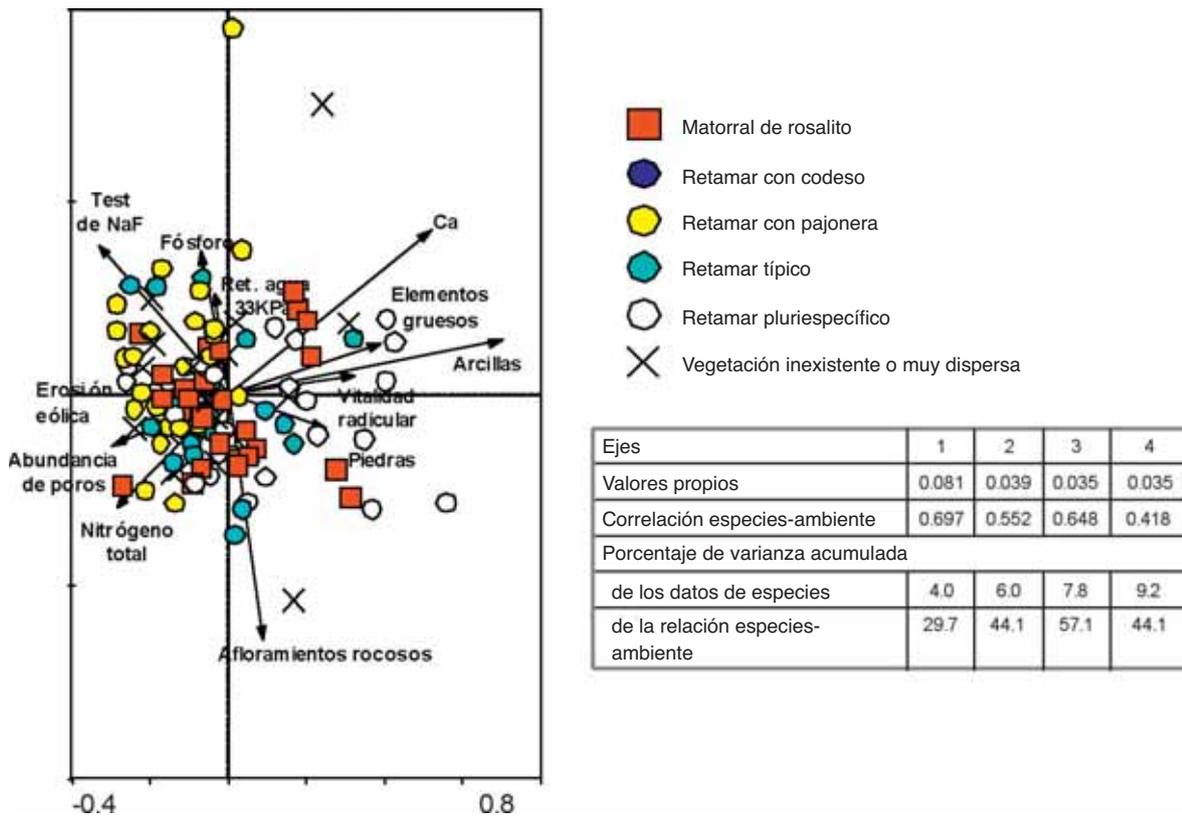


Figura 38. Análisis canónico de correspondencias (CCA), con exclusión de los pinares, ya que éstos constituyen comunidades discordantes en este entorno y se asientan sobre suelos de génesis antigua donde intervienen procesos ajenos a los que actúan actualmente en el Parque.

Figure 38. Canonical correspondence analysis (CCA), disregarding pine forest.

nados con el desarrollo de la estructura del suelo. Desde un punto de vista ecológico, se relaciona sobre todo con el grado de madurez del suelo. Y así vemos, que las localidades menos colonizadas por la vegetación, correspondientes con suelos en las primeras etapas de su evolución, aparecen aglomeradas en el extremo positivo del eje.

El segundo eje se relaciona con parámetros texturales, de pedregosidad, color, etcétera, fuertemente condicionados por el material de origen: las coladas traquibasálticas muestran puntuaciones mayoritariamente negativas en el eje II, los piroclastos sálicos y los depósitos de ladera tienden a mostrar puntuaciones próximas a cero o positivas.

La fuerte influencia del material de origen sobre las propiedades edáficas es una característica de los suelos juveniles, y tiende a diluirse a medida que el transcurso del tiempo ejerce como elemento uniformizador. En este sentido, la diversidad de litologías y las peculiares condiciones

ecológicas de la alta montaña tinerfeña hacen del Parque Nacional del Teide un marco singular de enorme interés para el estudio de las primeras etapas en la génesis de los suelos volcánicos.

Balance de nutrientes y carbono ligados a la materia orgánica del suelo

Respecto a la dinámica de nutrientes en el ecosistema, las principales conclusiones fueron (Figura 40):

Mayores aportes de N y P al suelo con los tejidos lignificados de retamar en los meses de marzo y julio, mientras que los mayores aportes de K al suelo se presentan con los tejidos lignificados del matorral de rosalito en el mes de julio.

Existe un mayor contenido de N en la hojarasca de retamar y matorral de rosalito que en el pinar y un mayor contenido de P en la hojarasca de retamar y pinar que en el matorral de rosalito,

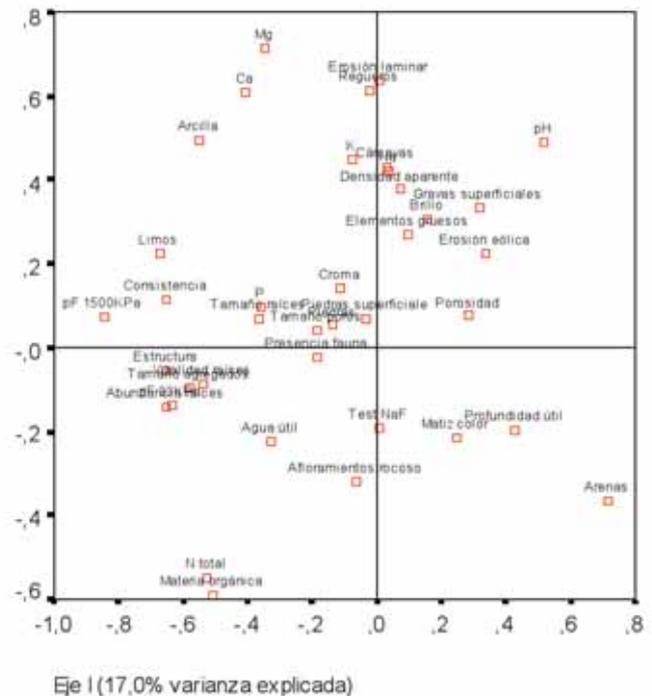
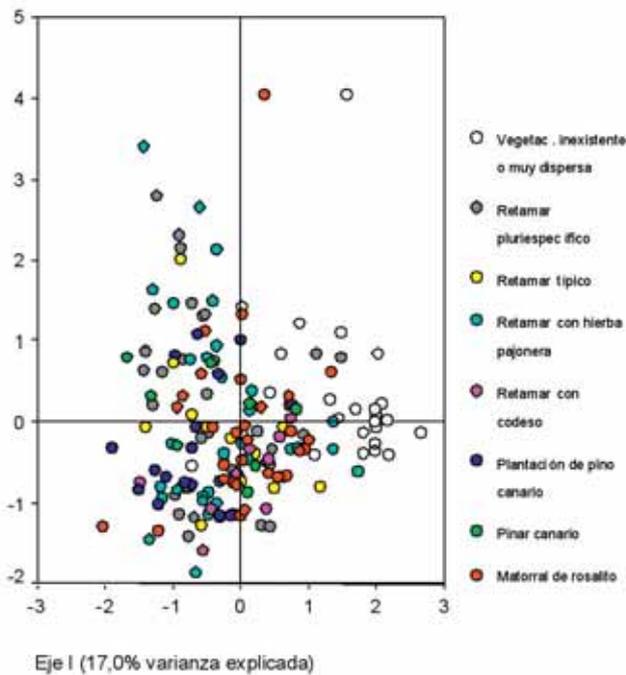


Figura 39. Análisis de Componentes Principales (PCA). El primer eje de variación muestra su mayor correlación con parámetros relacionados con el desarrollo de la estructura del suelo. El segundo eje se relaciona con parámetros texturales, de pedregosidad y color.

Figure 39. Principal Components Anlysis (PCA).

mientras que existen contenidos similares de K en los tres ecosistemas.

Se observa también una elevada variabilidad del contenido de micronutrientes, tanto en la fitomasa como en la hojarasca y un mayor contenido de nutrientes asimilables en las parcelas de retamar y matorral de rosalito, que en el pinar.

Por lo que se refiere a la dinámica del carbono en el ecosistema, podemos concluir que (Figura 41):

La formación de mantillo a partir de la hojarasca supone un cambio brusco en el grado de polimerización de la materia orgánica.

Existe un alto contenido en biomasa microbiana en los suelos, con mayores contenidos en la parcela de matorral de rosalito en tanto que la actividad respiratoria de la biomasa aparece en relación no muy clara con la humedad del suelo y parece más bien estar relacionada con la temperatura del mismo. Por otra parte la biomasa microbiana más activa aparece en la parcela de matorral de rosalito.

Los mayores contenidos de carbono y nitrógeno orgánico en el horizonte de incorporación, se encuentran en el retamar (Figura 42)

Las mayores emisiones de CO₂ del suelo, tanto en campo como en laboratorio se producen en la parcela de pinar en noviembre, coincidiendo con altos valores de C-lábil en el muestreo anterior (Figura 43).

La actividad celulasa es mayor en el retamar y en el pinar que en el matorral de rosalito, mientras que las actividades de las enzimas β-D glucosidasa y deshidrogenasa son mayores en el matorral de rosalito. La actividad fosfomonoesterasa es mayor en el retamar y en el matorral de rosalito y con elevada variabilidad estacional. La mayor actividad ureasa la presenta la parcela de pinar (Figura 44).

CONCLUSIONES

Como resultados obtenidos podemos destacar el mapa de la distribución de las unidades carto-

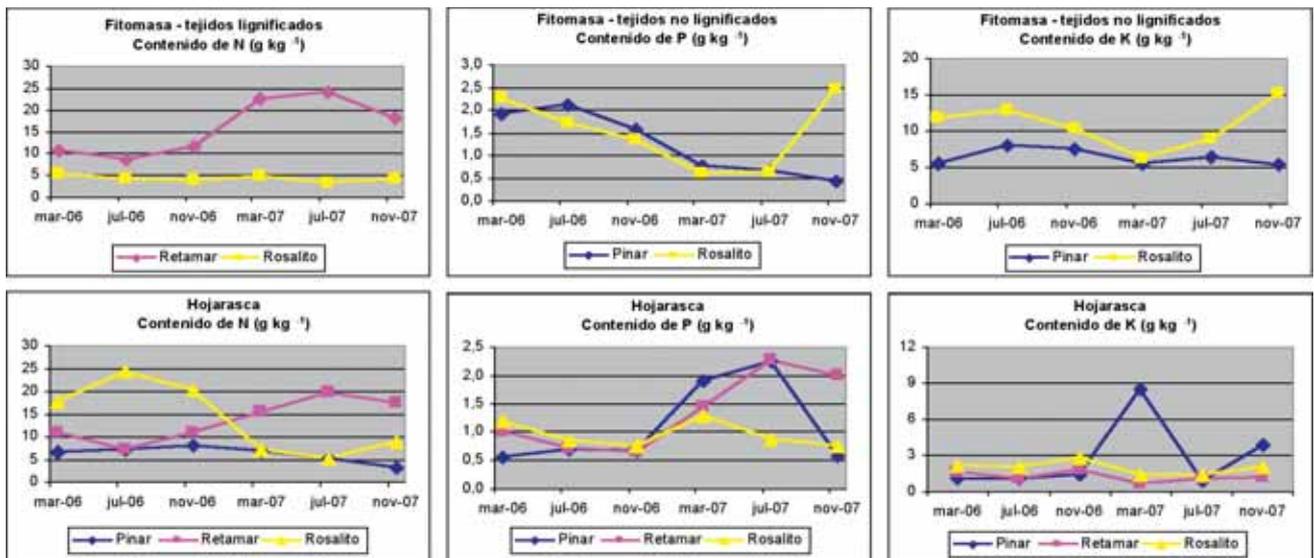


Figura 40. Mayores aportes de N y P al suelo con los tejidos lignificados de retamar en los meses de marzo y julio. Mayores aportes de K al suelo con los tejidos lignificados del matorral de rosálito en el mes de julio Mayor contenido de N en la hojarasca de retamar y matorral de rosálito que en el pinar. Mayor contenido de P en la hojarasca de retamar y pinar que en el matorral de rosálito. Contenidos similares de K en los tres ecosistemas. Elevada variabilidad del contenido de micronutrientes, tanto en la fitomasa como en la hojarasca. Mayor contenido de nutrientes asimilables en las parcelas de retamar y matorral de rosálito, que en el pinar.

Figure 40. Nutrients contents in biomass and litter.

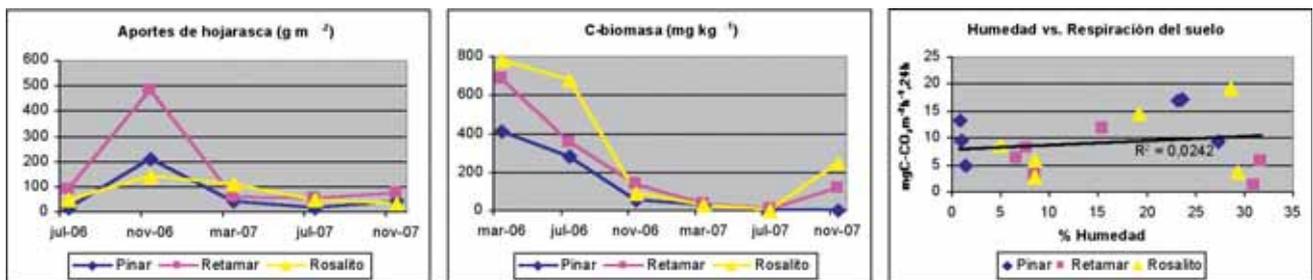


Figura 41. La formación de mantillo a partir de la hojarasca supone un cambio brusco en el grado de polimerización de la materia orgánica. Alto contenido en biomasa microbiana en todos los suelos, con mayores contenidos en la parcela de matorral de rosálito. Actividad respiratoria de la biomasa en relación no muy clara con la humedad del suelo. La biomasa microbiana más activa aparece en la parcela de matorral de rosálito.

Figure 41. Carbon supplies and soil respiration.

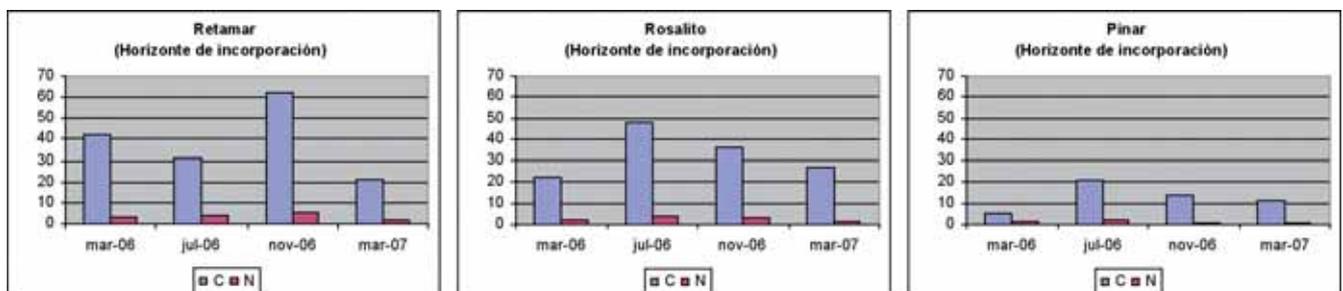


Figura 42. Carbono y nitrógeno en el horizonte de incorporación de materia orgánica.

Figure 42. Carbon and nitrogen levels in soil horizon of organic matter accumulation.

gráficas de suelos o edafopaisajes en el PN del Teide y la Base de Datos. Se han identificado once unidades taxonómicas del sistema FAO-WRB.

Se analizaron y cartografiaron 14 parámetros analíticos de un total de 173 puntos de muestreo y se realizaron 23 mapas, con su correspondiente

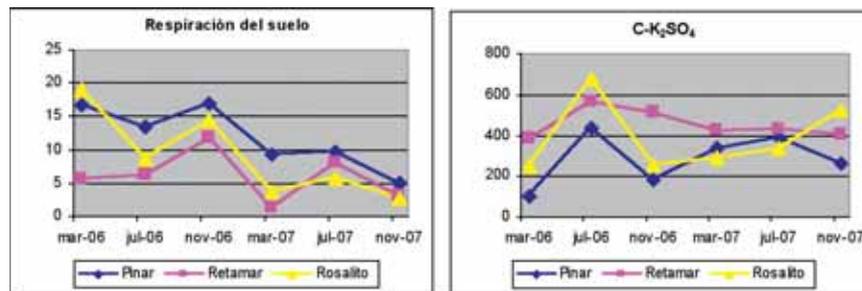


Figura 43. Respiración del suelo. Las mayores emisiones de CO₂ del suelo, tanto en campo como en laboratorio se producen en la parcela de pinar en noviembre.

Figure 43. Soil respiration.

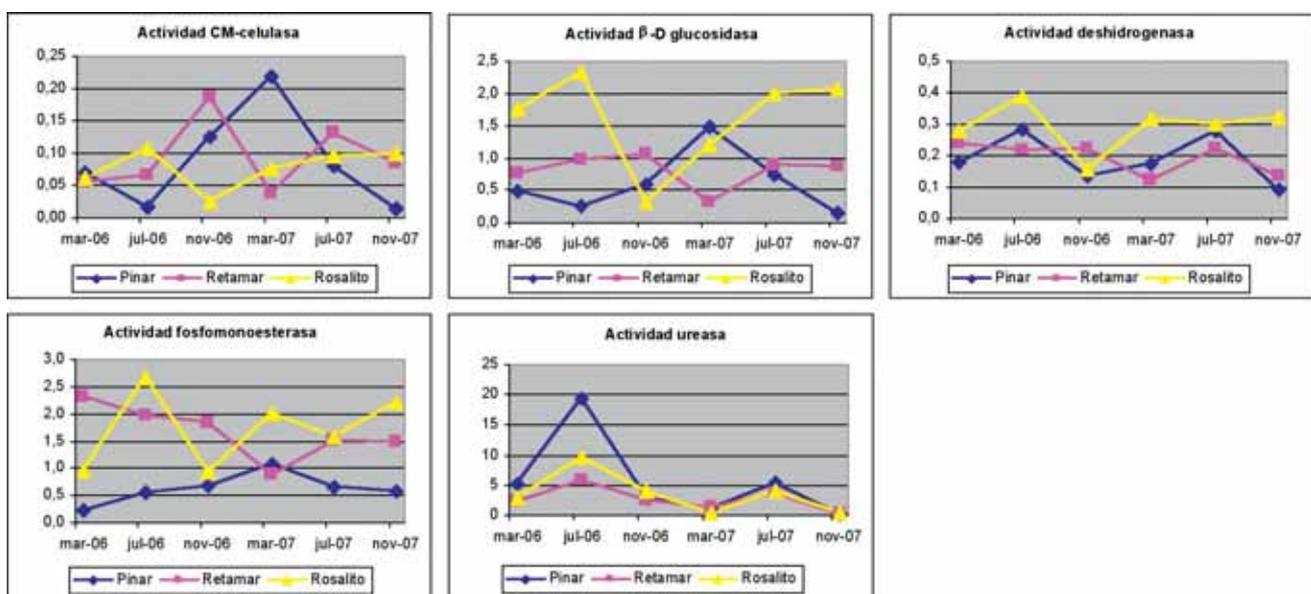


Figura 44. Actividades enzimáticas en los suelos.

Figure 44. Soil enzymatic activities.

Base de Datos, concluyendo que: Los contenidos en C orgánico y N total son muy bajos, tanto en peso (gkg^{-1}), como en superficie (kgm^{-2}); el pH es ácido en la mayor parte de los suelos; los niveles de P, Ca y Mg asimilables son muy bajos, al igual que los de K asimilable, aunque en este caso, ocasionalmente pueden ser muy altos y relacionados con la alteración de piroclastos ácidos (pumitas); niveles bajos a moderados de sodio y en relación también con la alteración de los materiales pumíticos. Los contenidos en arenas son muy altos en todos los suelos, la textura es mayormente francoarenosa con abundante pedregosidad y los suelos tienen una moderada a muy baja capacidad de retención de agua.

En cuanto a las “Relaciones ecológicas”, decir que el empleo de diversas técnicas de análisis multivariante de datos (PCA, DCA, CCA) ha permitido identificar los factores ecológicos relevantes en relación a los gradientes edáficos en el área de estudio. Entre los más significativos se cuentan la altitud y la orientación, la topografía y, muy particularmente, el material de origen del suelo, cuya influencia resulta especialmente importante en los suelos en las primeras etapas de su formación. Igualmente, hemos podido identificar las propiedades características de los suelos que sustentan las principales unidades de vegetación en el área: pinares marginales, retamares típicos o enriquecidos en hierba pajonera, for-

maciones pluriespecíficas y comunidades dominadas por el rosalito de cumbre, así como el efecto que sobre las propiedades del suelo tuvieron las actuaciones de plantaciones de pino canario llevadas a cabo en épocas pasadas en el entorno del Parque.

Por lo que se refiere a la "Dinámica de nutrientes en el ecosistema" se concluye que los mayores aportes de N y P al suelo se producen con los tejidos lignificados de retamar en los meses de marzo y julio, y los de K tienen lugar con los tejidos lignificados del matorral de rosalito en el mes de julio, existe un mayor contenido de N en la hojarasca de retamar y matorral de rosalito que en el pinar y un mayor contenido de P en la hojarasca de retamar y pinar que en el matorral de rosalito, mientras que aparecen contenidos similares de K en los tres ecosistemas y una elevada variabilidad del contenido de micronutrientes, tanto en la fitomasa como en la hojarasca.

En el apartado "Dinámica de carbono en los suelos", se concluye que: existe un alto contenido en biomasa microbiana, con mayores contenidos en la parcela de matorral de rosalito, la actividad respiratoria de la biomasa no tiene una relación muy clara con la humedad del suelo, los mayores contenidos de car-

bono y nitrógeno orgánico en el horizonte de incorporación, se producen en el retamar, las mayores emisiones de CO₂ del suelo, tanto en campo como en laboratorio se producen en la parcela de pinar en noviembre, coincidiendo con altos valores de C-lábil en el muestreo anterior. Finalmente se comenta la actividad enzimática relacionada con los ciclos del C y del N (celulasa, β -D glucosidasa, deshidrogenada, fosfomonoesterasa y ureasa).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto "Caracterización en entorno SIG de los recursos edáficos del Parque Nacional del Teide. Relaciones ecológicas y dinámica de nutrientes y carbono en los suelos" (Ref. 094/2003) del Organismo Autónomo Parques Nacionales del Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Medio Marino.

Agradecemos a todo el personal del Parque Nacional el apoyo logístico prestado para llevar a cabo el trabajo de campo, así como a Angel Bañares y Manuel Morales, personal científico del Parque su interés demostrado desde el inicio del proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, J. 2002. An inventory of data for reconstructing "natural steady state" carbon storage in terrestrial ecosystems. INQUA Terrestrial Carbon Commission, 17 p.
- ARBELO, C.D. 1989. Contribución al estudio del complejo de cambio en Andisoles. Resumen de Tesis Doctoral. Secretariado de Publicaciones. Universidad de La Laguna, 50 p.
- BLUM, W.E.H. 2002. Soil Quality Indicators based on Soil Functions. In: Man and Soil at the Third Millennium (J.L. Rubio et al. Eds), Geoforma Ediciones, pp.149-151.
- ESB 1999. Una Base de Datos de Suelos Georreferenciada para Europa. Manual de Procedimientos. Comité Científico del ESB, JRC, European Commission, 208 p.
- FERNANDEZ CALDAS, E. & GUERRA DELGADO, A. 1971. Condiciones de formación y evolución de los suelos de Tenerife. Anales de Edaf. y Agrob. XXX, 5-6.
- FERNANDEZ CALDAS, E., TEJEDOR, M.L. & HERNANDEZ MORENO, J.M. 1975. Andosoles Canarios. VII. Andosoles poco diferenciados, vítricos, fuertemente desaturados. Características morfológicas y químicas. Anales de Edaf. y Agrob. XXXIV, 5-6, 359-369.
- FERNÁNDEZ CALDAS, E. & TEJEDOR SALGUERO, M.L. 1975. Andosoles de las Islas Canarias. Ser. de Publ. de la Caja de Ahorros de S/C. de Tenerife .207 pp.
- FERNANDEZ CALDAS, E., CABEZAS, O., TEJEDOR, M.L. & RODRIGUEZ PASCUAL, C. 1977. Características mineralógicas de la fracción inferior a 2 μ en Vitrandepts evolucionados. Anales de Edaf. y Agrob. XXXVI,5-6, 449-468.

- FERNANDEZ CALDAS, E. & TEJEDOR SALGUERO, M.L. 1988. Los Suelos. En: "Geografía de Canarias" (A. Concepción ed.) Editorial Interinsular Canaria, S/C de Tenerife, pp. 243-256.
- FRANKS, C.D. et al. 2001. Organic Carbon Methods, Microbial Biomass, Root Biomass and Sampling Design under Development by NRCS. En "Assessment Methods for Soil Carbon" (R. Lal et al. Eds.) Advances in Soil Science, Lewis Publishers, pp. 105-113.
- GONZALEZ MANCEBO, J.M., BELTRAN, E., LOSADA, A. y SANCHEZ PINTO, L. 1996. La vida vegetal en las lavas históricas de Canarias. Organismo Autónomo Parques Nacionales, 255 p.
- HOYOS, A. 1945. Condiciones de formación de los suelos canarios. Anales de Edaf. y Agrob. IV, 3-65.
- HOYOS, A. 1948. Contribución al estudio de los suelos canarios. Anales de Edaf. y Agrob. VII, 257-271.
- IPCC 1996. Climate Change Impacts on Forests. En "Climate Change: Scientific-Technical Analyses". Cambridge University Press, UK, 879 p.
- KARLEN, D.L. and ANDREWS, S.S. 2000. The soil quality concept: A tool for evaluating sustainability. In Soil Stresses, Quality and Care, Porceed. From NJF Seminar 310, As (Norway) DIAS Report n° 38, Danish Inst. of Agric. Sciences.
- KHANNA, P.K. et al. 2001. Assessment and Significance of Labile Organic C Pools in Forest Soils. En "Assessment Methods for Soil Carbon" (R. Lal et al. Eds.) Advances in Soil Science, Lewis Publishers, pp. 167-182.
- KUBIENA, W.L. 1956. Materialien zur Geschichte der Bodenbildung auf den Westkanarem, VI Congr. Int. Sci., Paris (38), 241-246.
- LAL, R. et al. 1995. Towards Improving the Global Data Base on Soil Carbon. En "Soils and Global Change" (R. Lal et al. Eds.). Advances in Soil Science. CRC/Lewis Publishers, pp. 433-436.
- LAL, R. et al. Eds. 2000. Global Climate Change and Pedogenic Carbonates. CRC/Lewis Publishers. Boca Raton, FL (USA).
- LAL, R. 2000. Soil aggregation and carbon sequestration. En "Global Climate Change and Tropical Ecosystems" (R. Lal et al. Eds.) CRC-Lewis Publishers, FL, USA, pp.317-329.
- LAL, R. (Ed.) 2001. Soil Carbon Sequestration and the Greenhouse Effect. SSSA Spec. Publ. N° 57, Soil Science Soc. of America, Inc., Madison, WI, USA, 236 p.
- MACÍAS, F. et al. 2001. *Los suelos como sumidero de carbono: Materia orgánica de los suelos de Galicia*. XXII Reunión Nacional de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo. Universidad de Santiago de Compostela, pp. 118-121.
- MARTÍNEZ DE PISÓN, E. & QUIRANTES, F. 1981. El Teide. Estudio Geográfico. Ed. Interinsular Canaria, S/C de Tenerife, 187 p.
- MORALES GIL, A., MARTÍN GALAN, F. & QUIRANTES, F. 1977. Formas periglaciares en Las Cañadas del Teide (Tenerife). Aula de Cultura del Cabildo Insular, S/C de Tenerife, 81 p.
- QUANTIN, P., RODRIGUEZ PASCUAL, C., FERNANDEZ CALDAS, E. & TEJEDOR, M.L. 1975. Andosoles Canarios. VIII. Andosoles poco diferenciados, vítricos, fuertemente desaturados. Características mineralógicas. Interpretación y Clasificación. Anales de Edaf. y Agrob. XXXIV, 5-6, 371-381.
- RECATALA, L. & SANCHEZ, J. 2002. Indicadores de calidad del suelo y sostenibilidad. No publicado.
- RODRIGUEZ PASCUAL, C., GALVÁN, J., TEJEDOR, M.L. & FERNANDEZ CALDAS, E. 1978. Estudio mineralógico de las arcillas de Andepts, en una secuencia cronológica, mediante microscopía electrónica. Anales de Edaf. y Agrob. 11-12, 989-1001.
- RODRIGUEZ RODRIGUEZ, A. 2001. El concepto de Calidad del Suelo. Sociedad Española de la Ciencia del Suelo. No publicado.
- RODRIGUEZ RODRIGUEZ, A. & MORA HERNÁNDEZ, J.L. 2001. Los Suelos. En: "Gran Atlas Temático de Canarias" (R. Pérez y G. Morales Eds.) Editorial Interinsular Canaria, S/C de Tenerife, pp. 107-120.
- SANCHEZ CALVO, M.C. 1958. El braunlehm y las tendencias de su alteración en las Canarias Occidentales. Anales de Edaf. y Agrob. XVII, 407-437.
- SANCHEZ CALVO, M.C. 1961. Alofanos y otros coloides en las arcillas de braunlehm y sus alteraciones en las Canarias Occidentales. Anales de Edaf. y Agrob. XX, 189-208.

- SANCHEZ DÍAZ, J, AGUILAR, J., ARBELO, C.D., BOIXADERA, J., COLOMER, J.C., IBAÑEZ, J.J., MACÍAS, F., ORTIZ, R., RODRIGUEZ RODRIGUEZ, A. & SANCHEZ GARRIDO, J.A. 2002. Norma Técnica para la elaboración de la cartografía de suelos. <http://edafologia.ugr.es/normatec>
- SCHULZ, E. et al. 2002. Influence of Soil Type and Fertilization on Accumulation and Stabilization of Organic Carbon in Different SOM Fractions. En "Sustainable Utilization of Global Soil and Water Resources. III.-Technology and Method of Soil and Water Conservation" (W. Lianxiang et al. Ed), Tsinghua University Press, Beijing, pp.304-308.
- SSSA, 1995. Statement on soil quality. Agronomy News, June 7, Soil Sci. Soc. of America, Madison, WI. USA.
- TEJEDOR, M.L. 1974. Estudio de los andosuelos de las Islas Canarias Occidentales (Tenerife, Gomera y Hierro). Tesis Doctoral, Universidad de La Laguna, 329 p. (inédita).
- TEJEDOR, M.L., HERNANDEZ, J.M. CABEZAS, O. & FERNANDEZ CALDAS, E. 1976. Materiales amorfos en Dystrandeps y Vitrandeps evolucionados. Anales de Edaf. y Agrob. XXXV, 9-10, 877-887.
- UGOLINI, F.C. 1986. Processes and rates of weathering in cold and polar desert environments. In: M.C. Steven et al. (Eds). Rates of chemical weathering of rocks and minerals. Academic Press, Inc., 193-235.
- WRB 2007. World Reference Base for Soil Resources. FAO, ISRIC,ISSS, Roma, 88 p.

