



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

**Máster en Investigación en Ingeniería para la
Conservación y Uso Sostenible de Sistemas Forestales**

**Influencia de los parámetros edáficos,
topográficos y climáticos sobre el índice de
sitio de *Pinus sylvestris* L. en las masas de
León y Palencia.**

Alumna: Teresa de los Bueis Mellado

Tutora: M^a Belén Turrión Nieves
Cotutor: Felipe Bravo Oviedo

Julio de 2012

INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS EDÁFICOS, TOPOGRÁFICOS Y CLIMÁTICOS SOBRE EL ÍNDICE DE SITIO DE *Pinus sylvestris* L. EN LAS MASAS DE LEÓN Y PALENCIA.

Teresa de los Bueis Mellado

Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es desarrollar un modelo discriminante capaz de predecir la calidad de estación de rodales de *Pinus sylvestris* L. en los páramos ácidos de León y Palencia a partir de parámetros topográficos, edáficos (físicos, químicos y bioquímicos) y climáticos. Para cumplir este objetivo se han utilizado datos de 35 parcelas permanentes representativas de tres calidades de estación. Tras analizar 15 modelos discriminantes mediante validación cruzada se obtuvo el modelo definitivo que tiene como variables explicativas al índice de Lang, la porosidad, la acidez de cambio, el carbono de la biomasa microbiana y el espesor del horizonte orgánico. Este modelo discriminante clasifica correctamente el 77,14% de los casos, lo que es un buen valor para este tipo de estudios.

Palabras clave: *Pinus sylvestris* L., índice de sitio, productividad, factores edáficos, factores topográficos, factores climáticos.

SUMMARY

The aim of this study was to develop a discriminant model to predict site index in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in León and Palencia stands using topographic, edaphic (physical, chemical and biochemical) and climatic parameters. To meet this objective, data from 35 stands classified into three different site index classes were used. After analyzing 15 discriminant models by cross-validation, a model containing Lang index, porosity, exchange acidity, carbon of microbial biomass and organic horizon thickness as predictor was obtained. This discriminant model classifies correctly 77,14 % of cases, which is a good value for this kind of studies.

Keywords: *Pinus sylvestris* L., soil-site method, site index, site productivity, edaphic factors, topographic factors, climatic factors.

INTRODUCCIÓN

Pinus sylvestris L. es la especie de su género de mayor distribución mundial, siendo las españolas sus poblaciones más meridionales, donde ocupa 1,28 millones de hectáreas (Serrada *et al.*, 2008). Se trata de la especie más frecuentemente usada en repoblaciones en Castilla y León, donde ocupa 336742 ha. De acuerdo con el Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3) (DGCN, 2002), en las provincias objeto de

estudio, León y Palencia, ocupan respectivamente 56785 y 22429 ha. Para poder llevar a cabo una gestión sostenible de estas masas adaptada a las distintas estaciones es necesario conocer cuál es la calidad de estación de las mismas. Su determinación en estadios iniciales de las masas permite decidir la selvicultura más adecuada a aplicar en cada caso.

La productividad de una estación se puede determinar a través de la medición repetida de las existencias, volumen extraído y mortalidad de la masa a lo largo del turno. Sin embargo, esta metodología es costosa y requiere mucho tiempo por lo que la productividad se suele estimar a partir de factores intrínsecos o extrínsecos de la masa. Uno de los factores intrínsecos más frecuentemente utilizados para la determinación de la calidad de estación es la altura de la masa ya que dicho parámetro está fuertemente correlacionado con la producción maderable (Ortega and Montero, 1988; Skovsgaard and Vanclay, 2008). Cuando la altura que se evalúa es la altura dominante (altura de los 100 árboles más gruesos por hectárea) a una edad concreta denominada edad típica el índice de calidad toma el nombre de índice de sitio (IS). La altura dominante es una variable que además de estar muy correlacionada con el crecimiento en volumen es fácilmente medible y se ve poco afectada por las prácticas selvícolas habituales (claras sistemáticas, semisistemáticas o por lo bajo).

El IS puede estimarse a su vez a través de métodos geocéntricos que se basan en el estudio de parámetros ambientales (clima, topografía, suelo, vegetación, etc.) o mediante métodos fitocéntricos que estudian parámetros de la fitocenosis (Ortega and Montero, 1988; Vanclay, 1994; Skovsgaard and Vanclay, 2008). Cuando se realizan cortas que modifican la altura dominante de la masa (cortas en que se extraen los pies dominantes) el IS obtenido a través de parámetros de la masa es subestimado (Bravo and Montero, 2001). En estos casos es más apropiado el uso de métodos desarrollados a través del estudio de variables ambientales, entre los que se encuentran aquellos basados en las relaciones suelo-crecimiento que se desarrollan a partir de parámetros edáficos (Szwaluk and Strong, 2002). Son frecuentes los trabajos que incluyen además de los parámetros edáficos, parámetros topográficos y climáticos (Corona *et al.*, 1998; Seynave *et al.*, 2005; Álvarez-Álvarez *et al.*, 2011; Bravo-Oviedo *et al.*, 2011).

Los parámetros edáficos que se suelen incluir en este tipo de estudios son los físico-químicos, es decir, aquellos relacionados con la profundidad del suelo, textura, nutrientes, estructura, drenaje, etc. (Corona *et al.*, 1998; Bravo and Montero, 2001; Stendahl *et al.*, 2002; Bravo-Oviedo and Montero, 2005; Seynave *et al.*, 2005; Afif-Khoury *et al.*, 2010; Bravo *et al.*, 2011; Bravo-Oviedo *et al.*, 2011). Son escasos los estudios relacionados con la productividad y gestión forestal que incluyan parámetros

bioquímicos (Mahía *et al.*, 2006) a pesar de que los microorganismos son un elemento determinante de la calidad del suelo y por tanto, de la calidad de estación al descomponer la materia orgánica permitiendo su absorción por parte de las plantas y posibilitando así la recirculación de nutrientes dentro del ecosistema forestal. Es por esto que en el presente estudio también se han tenido en consideración parámetros bioquímicos. Todos los estudios recientes relativos a la calidad del suelo incluyen parámetros físicos, químicos y bioquímicos (García *et al.*, 2003).

Es de gran interés, por tanto, conocer cuáles de estas variables ambientales determinan el IS y con ellas, desarrollar herramientas a través de las cuales predecir el IS, especialmente cuando la información dasométrica del estrato dominante no está disponible.

El objetivo general de este trabajo es estudiar los parámetros edáficos (físicos, químicos y bioquímicos), topográficos y climáticos que determinan la productividad de estaciones de *Pinus sylvestris* L. en los páramos ácidos de Castilla y León y desarrollar un modelo capaz de predecir la clase de calidad de estación a partir de dichos parámetros. Para alcanzar este objetivo se analizará el potencial de las variables edáficas para la estimación del IS mediante el ajuste de un modelo discriminante.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de muestreo y parcelas

Según los datos del Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3) (DGCN, 2002), en las provincias objeto de estudio, León y Palencia, *Pinus sylvestris* L. ocupa una superficie de 79214 ha (56785 ha en León y 22429 ha en Palencia) en su mayoría en altitudes entre los 800 y 1600 msnm. Esta especie requiere una precipitación anual de entre 600 y 1200 mm y una precipitación estival superior a 100 mm (Bravo-Oviedo y Montero, 2008). La función principal que cumplen estas masas es la protectora-productora.

El presente trabajo se ha desarrollado en 35 parcelas pertenecientes a la red de parcelas del Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (Universidad de Valladolid-INIA) (Figuras 1 y 2). Se ha contado con datos de altura dominante y edades de dichas parcelas, las cuales están comprendidas entre los 28 y 54 años. La pluviometría anual media de la zona de estudio es de unos 730 mm y su temperatura media anual de unos 9,5°C. Dichas parcelas se encuentran a altitudes comprendidas entre los 926 y los 1180 msnm. Los valores medios que presentan los índices de Lang, Martonne y el índice hídrico anual clasifican la zona de estudio como

zona húmeda. Los suelos presentes en la zona se clasifican como Typic Dystroxept, Typic Dystrudept (Herrero, 2010), Typic Haplohumults y Humic Hapludults (López, 2003). Las parcelas estudiadas representan un amplio rango de situaciones selvícolas (Tabla 1).

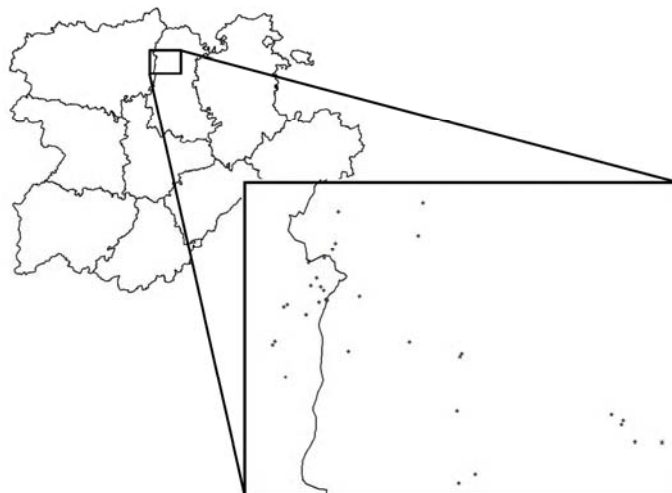


Figura 1. Localización del área de estudio y las parcelas.

Tabla 1. Media, desviación típica, valor mínimo y máximo que presentan las principales variables dasométricas en las parcelas de estudio. (Ho: altura dominante, Hm: altura media, Dg: diámetro medio cuadrático, G: área basimétrica; IS: índice de sitio).

Variable	Media	Desviación típica	Mínimo	Máximo
Edad (años)	39,8	7,4	28,0	54,0
Densidad (pies/ha)	1102,9	423,0	400,0	2083,3
Ho (m)	14,5	3,6	8,5	22,8
Hm (m)	13,6	3,7	7,3	22,9
Dg (cm)	20,3	4,1	13,9	34,7
G (m ² /ha)	33,1	8,2	16,8	53,6
IS (m)	18,0	2,8	12,6	22,6

Se han tenido en consideración las cinco clases de calidad (24, 21, 18, 15, 12) basadas en el índice de sitio (edad típica 50 años) que se corresponden con las curvas de calidad desarrolladas por del-Río *et al.* (2006) para *Pinus sylvestris* L. en Castilla y León. Cada parcela de estudio ha sido asignada a su correspondiente clase de calidad a través del cálculo de su índice de sitio (altura dominante a la edad típica de 50 años) partiendo de su altura dominante y su edad actuales y con la ecuación desarrollada por del-Río *et al.* (2006) para este fin que se muestra a continuación:

$$H_{02} = \frac{40,3331}{1 - \left[\left(1 - \frac{40,3331}{H_{01}} \right) \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{1,5003} \right]}$$

siendo H_{01} y H_{02} las alturas dominantes a las edades T_1 y T_2 respectivamente.

De este modo, las 35 parcelas de estudio resultaron clasificadas de esta manera: una parcela en la clase 24, 12 parcelas en la clase 21, 8 parcelas en la clase 18, 13 parcelas en la clase 15 y una parcela en la clase 12. Debido a que las clases extremas presentan una única parcela, la clase 24 se agrupó con la 21 y la clase 12 con la 15 de igual modo que hicieron Bravo-Oviedo and Montero (2005).

Datos edáficos y climáticos

Los muestreos edáficos que se han llevado a cabo incluyen el horizonte orgánico y los 10 primeros cm de suelo mineral. En cuanto a las muestras de suelo mineral el muestreo se ha limitado a los 10 primeros cm de acuerdo con la metodología propuesta por Jokela *et al.* (1998), metodología adoptada posteriormente en varios trabajos (Bravo y Montero, 2001; Bravo *et al.*, 2011). Esto se debe a que las variaciones ambientales existentes se reflejan de modo más intenso en estos primeros centímetros. Del suelo mineral se han obtenido muestras tanto alteradas como inalteradas. Para la obtención de muestras tanto alteradas como inalteradas de suelo mineral se han fijado, en cada una de estas parcelas cuatro puntos a 5 m al N, S, E y O del centro de la parcela, de manera que se ha contado con 4 puntos de muestreo por parcela. En dichos puntos se han tomado muestras de los 10 primeros cm del suelo mineral que han sido mezcladas para obtener una única muestra compuesta para cada parcela. Asimismo en cada uno de los puntos de muestreo se ha tomado una muestra de suelo inalterado (cuatro en total) para las determinaciones por duplicado de la capacidad de campo y la densidad aparente.

Para el estudio del horizonte orgánico se han muestreado los cuatro puntos detallados anteriormente. Sobre las muestras de suelo mineral se han determinado parámetros físicos, químicos y bioquímicos. Todas las determinaciones se han realizado por duplicado. Los parámetros químicos que se han estudiado son: pH y conductividad eléctrica (CE) con pHmetro y conductímetro con corrección automática por temperatura en suspensión de suelo en agua 1:2,5 (M.A.P.A., 1993), relación C Total/N Total (CT/NT) a partir de la determinación del C y N totales mediante combustión seca con el analizador automático *Leco CHN 2000*, C fácilmente oxidable (CFO) por el método propuesto por Walkley and Black (1934), capacidad de cambio catiónico (CCC) mediante el método del cloruro de bario y trietanolamina a pH 8.5 (Mehlich, 1953), bases de cambio (Ca, Mg, K y Na) mediante la extracción con acetato de amonio 1 N a pH 7 (Schollenberger and Simon, 1945) y posterior determinación mediante espectroscopía de absorción atómica, saturación de bases (Sat) calculado como la relación en porcentaje entre la suma de los cationes de cambio y la CCC, P

asimilable (Pas) mediante extracción con membranas de intercambio iónico y posterior determinación del P mediante el método colorimétrico de Murphy and Riley (1962), contenido de Fe, Al y Mn en forma amorfa (Fe_A , Al_A , Mn_A) mediante extracción con oxalato de amonio 0.2 M a pH 3 (Blakemore *et al.*, 1987); Fe, Al y Mn en formas complejadas con la materia orgánica (Fe_M , Al_M , Mn_M) mediante extracción con $Na_4P_2O_7$ 0,1M (Bascomb, 1968); Al intercambiable (Al_E) extraído con KCl 1M (Bertsch and Bloom, 1996). La determinación de los contenidos en Fe, Al y Mn de dichos extractos se ha realizado mediante espectroscopía de plasma ICP-OES. Con dichos datos se calculó también el Al inorgánico (Al_I) por diferencia entre la fracción complejada con la materia orgánica y la fracción amorfa. Los parámetros bioquímicos que se han determinado son: C y N mineralizable (C_{min} , N_{min}) por el método descrito por Gartzia-Bengoetxea *et al.* (2009) y C, N y P de la biomasa microbiana (C_{mic} , N_{mic} , P_{mic}). Para la determinación del C_{mic} y N_{mic} se ha utilizado el método de fumigación-extracción de Vance *et al.* (1987) y posterior determinación de C y N con autoanalizador *TOC Skalar* para muestras líquidas. Asimismo, para la determinación del P_{mic} se ha seguido el método de Brookes *et al.* (1982) con determinación final colorimétrica del P extraído (Murphy and Riley, 1962). Los parámetros físicos que se han analizado son: textura mediante el método de la pipeta (M.A.P.A., 1993), porosidad a través de la determinación de la densidad aparente (Dap) y la densidad real (Dr) y agua útil (AU) a través de la determinación de la capacidad de campo (CC) y el coeficiente de marchitamiento (CM) en equipo de pF.

Las muestras provenientes del horizonte orgánico se han separado diferenciando entre capa L (material orgánico fresco, formado principalmente por hojarasca, ramillas y materiales leñosos sin fragmentar o ligeramente fragmentados, fácilmente reconocibles) y capa F y capa H conjuntamente (material orgánico fragmentado o alterado y material orgánico amorfo, coprogénico y humificado). El material así obtenido ha sido secado a 60° C y pesado para obtener la cantidad de biomasa existente por unidad de superficie de cada una de dichas fracciones (O_L y O_{FH}) y una alícuota representativa de cada fracción se ha molido y ha servido para determinar la relación CT/NT de la fracción L ($[CT/NT]_L$) y de la fracción FH ($[CT/NT]_{FH}$) a partir de la determinación de las concentraciones de C y N totales de cada una de dichas fracciones (CT_L , CT_{FH} , NT_L , NT_{FH}). En campo se ha medido asimismo el espesor del horizonte orgánico (Esp O).

Además de los parámetros edáficos se han tenido en consideración datos climáticos (Tabla 2) y topográficos (Tabla 3). Los datos climáticos se han obtenido a través del Atlas Climático Digital de la Península Ibérica (Ninyerola *et al.*, 2005) para cada una de las parcelas de estudio. Los parámetros que se han considerado han

sido: precipitaciones estacionales, precipitación anual (Pa), temperatura media anual (Tma), temperatura media mensual del mes más frío (Tmmf) y más cálido (Tmmc), temperatura media de las mínimas del mes más frío (Tminf), temperatura media de las máximas del mes más cálido (Tmaxc), evapotranspiración potencial anual (ETP), evapotranspiración real anual (ETR), déficit y superávit hídrico. También se han tenido en consideración el Índice de Martonne [$I=Pa/(Tma+10)$] (De Martonne, 1926), el Índice de Lang [$I=Pa/Tma$] (Lang, 1915) y el Índice hídrico anual (Im) (Thornthwaite, 1949) que se ha calculado a partir de las siguientes expresiones:

$$Im = Ih - 0,6Ia \quad Ih = \frac{\text{Superávit}}{\text{ETP}} \cdot 100 \quad Ia = \frac{\text{Déficit}}{\text{ETP}} \cdot 100$$

Pinus sylvestris L. requiere una precipitación mínima de 100 mm en el periodo estival y una precipitación media anual entre 600 y 1200 mm. Los valores existentes para estos parámetros en las parcelas de estudio (Tabla 2) son similares a los requeridos por la especie de interés.

Atendiendo a la clasificación que propone el Índice de Lang, el clima en las parcelas de estudio se clasifican como de *Zonas húmedas de bosques claros*. Asimismo, de acuerdo con la clasificación derivada del Índice de Martonne la zona de estudio se clasifica como *Húmeda*. En relación al Índice hídrico anual (Im) el tipo climático en que se clasifican las parcelas de estudio varía de subhúmedo ($0 < Im < 20$) a húmedo ($20 < Im < 100$).

Tabla 2. Media, desviación típica, valor mínimo y máximo que presentan los parámetros climáticos analizados para las parcelas de estudio [Fuente: elaboración propia a partir de Ninyerola *et al.* (2005)] (P: precipitación; Pa: precipitación anual; Tma: temperatura media anual; Tmaxc: temperatura media de las máximas del mes más cálido; Tmma: temperatura media mensual más alta; Tmmb: temperatura media mensual más baja; Tminf: temperatura media de las mínimas del mes más frío; ETR: evapotranspiración real; ETP: evapotranspiración potencial, Im: Índice hídrico anual).

Parámetros Climáticos	Media	Desviación típica	Mínimo	Máximo
Pa (mm)	734,2	80,3	596,8	942,5
Pinvierno (mm)	235,6	32,5	182,0	318,8
Potoño (mm)	207,4	26,2	159,1	264,0
Pprimavera (mm)	183,0	16,2	158,3	237,1
Pverano (mm)	108,0	6,9	92,9	122,6
Tma (°C)	9,6	0,4	8,8	10,4
Tmaxc (°C)	26,0	0,4	25,2	26,9
Tmma (°C)	18,1	0,4	17,4	19,0
Tmmb (°C)	2,4	0,4	1,5	3,1
Tminf (°C)	-2,1	0,4	-2,9	-1,3
Déficit hídrico (mm)	133,0	17,9	99,6	172,6
Superávit hídrico (mm)	249,3	72,3	130,8	445,9
ETP (mm)	617,8	11,6	596,2	641,9
ETR (mm)	484,8	10,7	456,9	498,0
Índice de Lang	77,1	10,9	57,9	107,1
Índice de Martonne	37,6	4,7	29,4	50,1
Im	27,6	13,7	4,3	64,8

Tabla 3. Media, desviación típica, valor mínimo y máximo que presentan los parámetros topográficos analizados en las parcelas de estudio.

Parámetros Topográficos	Media	Desviación típica	Mínimo	Máximo
Altitud (m)	1067,4	72,0	926,0	1180,0
Latitud (°)	42,7	0,1	42,6	42,8
Pendiente (%)	2,3	3,2	0,0	12,0

Las características físicas de los suelos estudiados (Tabla 4) muestran que las texturas que presentan son francas, franco-arenosas y franco arcillosas. Asimismo se observan grandes diferencias en el contenido de gruesos de los distintos suelos estudiados. La textura tiene una importancia capital en el crecimiento forestal ya que determina en gran medida la capacidad de retención de agua y nutrientes y la aireación del suelo (Pritchett, 1986).

Tabla 4. Media, desviación típica, valor mínimo y máximo que presentan los parámetros edáficos físicos analizados en las parcelas de estudio. (CC: capacidad de campo; CM: coeficiente de marchitamiento; AU: agua útil; Dap: densidad aparente; Dr: densidad real; Arena/Limo ISSS: arena/limo según sistema International Society of Soil Science; Arena/Limo USDA: arena/limo según sistema United States Department of Agriculture).

Parámetros Físicos	Media	Desviación típica	Mínimo	Máximo
CC (%)	15,9	4,1	9,0	24,9
CM (%)	8,7	2,3	4,6	15,9
AU (%)	7,1	2,7	2,3	13,4
Dap (g·cm⁻³)	1,1	0,1	0,9	1,4
Dr (g·cm⁻³)	2,2	0,2	1,7	2,5
Porosidad (%)	49,9	7,1	35,4	65,1
Finos (<2mm) (%)	72,9	16,3	43,6	99,6
Gruesos (>2mm) (%)	27,1	16,3	0,4	56,4
Arcilla (%)	13,1	1,5	9,5	18,0
Arena ISSS (%)	70,3	7,4	55,1	83,7
Arena USDA (%)	58,8	10,7	40,2	75,5
Limo ISSS (%)	16,7	6,9	6,8	32,6
Limo USDA (%)	28,2	10,3	14,8	46,9

A través del estudio de la densidad real y la densidad aparente de un suelo podemos conocer la porosidad presente, parámetro que influye directamente sobre la aireación del suelo y su contenido en agua (Cobertera, 1993). La densidad real de los suelos minerales varía entre 2,6 y 2,7 g/cm³ por lo que la presente en el horizonte superficial estudiado es reducida debido a su elevado contenido en materia orgánica. La densidad aparente por su parte suele variar entre 0,2 g/cm³ en las capas orgánicas y 1,9 en las arenas gruesas (Fisher and Binkley, 1999). De esta manera la porosidad media de los suelos forestales varía entre el 35 y el 65% (Pritchett, 1986). Los valores de densidad aparente y densidad real observados en los suelos de estudio son medios ya que se trata del horizonte superficial del suelo, con elevado contenido en materia orgánica, y determinan una porosidad también media (50%).

Las características químicas de los suelos estudiados aparecen resumidas en la Tabla 5. La acidez de cambio da idea de la acidez potencial del suelo mientras que el pH medido en solución suelo-agua 1:2,5 da idea de la acidez activa del suelo. La acidez de los suelos tiene efectos directos sobre el crecimiento forestal a través de la influencia que tiene sobre la actividad microbiana y la disponibilidad de los nutrientes de manera que la disponibilidad de micronutrientes como el B, Cu, Mn y Fe es mayor al aumentar la acidez del suelo a diferencia de macronutrientes como el N, S, P, K, Ca, Mg que mejoran su disponibilidad a pH superiores. Los hongos por su parte son tolerantes a la acidez, pero son menos competitivos a pH menores de 6 mientras que las bacterias son menos tolerantes a la acidez disminuyendo su actividad con la misma (Pritchett, 1986). Los suelos de estudio son ácidos, con pH entre 3,7 y 5,6 por lo que es posible que aparezcan problemas de disponibilidad de algunos macronutrientes como el fósforo.

La CCC es la capacidad que tienen los suelos de retener los iones nutritivos estando así disponibles para su absorción por parte de la planta. Los valores entre los que suele oscilar este parámetro son 10 y 30 $\text{cmol}_{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$ que coincide con el rango encontrado en los suelos estudiados.

El P es un elemento imprescindible en los procesos de intercambio de energía en los seres vivos y su disponibilidad para las plantas está condicionada por la acidez del suelo y la actividad de los microorganismos que mediante la descomposición de la materia orgánica permiten su recirculación en el ecosistema (Pritchett, 1986). En las parcelas de estudio se han observado bajos contenidos de la fracción asimilable de este elemento.

El estudio de las formas amorfas de Fe y Al e inorgánicas del Al se debe a que en estudios previos se han hallado correlaciones significativas entre los contenidos de dichas fracciones de estos elementos y la inmovilización del P (Molina *et al.*, 1991). Esto se debe a que en suelos muy ácidos como es el caso de la zona de estudio, el Fe, Al y Mn forman complejos insolubles con el P (Pritchett, 1986). El Al^{+3} de cambio (Al_E) junto con el H^+ , confieren acidez al suelo.

Los contenidos en Ca de los suelos estudiados se encuentran en el rango de valores observados habitualmente en los suelos forestales y que varían entre los 50 y 1000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Pritchett, 1986). Éste suele ser el catión más abundante en los suelos forestales, a excepción de los suelos muy ácidos donde pasa a serlo el Al. El K es un nutriente imprescindible para los árboles, es un catión muy móvil y suele ser abundante en la disolución del suelo. Las concentraciones de Mg suelen ser de entre el 20 y el 50% de las del Ca en la mayoría de los suelos (Fisher and Binkley, 1999) y en los suelos estudiados están en ese rango.

Tabla 5. Media, desviación típica, valor mínimo y máximo que presentan los parámetros edáficos químicos analizados en las parcelas de estudio. (AC: acidez de cambio; CCC: capacidad de cambio catiónico; CFO: carbono fácilmente oxidable; CT: carbono total; NT: nitrógeno total; Pas: fósforo asimilable; Fe_A: formas amorfas de Fe; Al_A: formas amorfas de Al; Mn_A: formas amorfas de Mn; Al_E: Al intercambiable; Al_I: Al inorgánico; Fe_M: formas de Fe complejadas con la materia orgánica; Al_M: formas de Al complejadas con la materia orgánica; Mn_A: formas de Mn complejadas con la materia orgánica; Sat: saturación de bases).

Parámetros Químicos	Media	Desviación típica	Mínimo	Máximo
AC (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	13,4	4,5	5,6	23,6
CCC (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	19,5	3,4	12,1	25,6
CFO (%)	2,2	0,5	1,3	3,4
CFO/CT	0,5	0,1	0,4	0,7
CT/NT	29,6	5,0	19,2	41,3
Pas (mg.kg ⁻¹)	5,0	2,1	1,7	8,9
pH	4,6	0,5	3,7	5,6
Al _A (mg.g ⁻¹)	30,5	18,26	0,75	61,20
Al _E (mg.g ⁻¹)	68,8	68,0	0,8	249,3
Al _I (mg.g ⁻¹)	28,2	17,6	0,0	57,2
Al _M (mg.g ⁻¹)	2,4	1,0	0,7	4,8
Fe _A (mg.g ⁻¹)	37,9	22,9	1,6	91,1
Fe _M (mg.g ⁻¹)	2,5	1,0	1,0	4,3
Mn _A (mg.g ⁻¹)	5,9	9,4	0,0	37,1
Mn _M (mg.g ⁻¹)	0,2	0,2	0,0	0,6
K (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,19	0,07	0,1	0,5
Ca (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,97	0,72	0,25	2,93
Mg (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,14	0,13	0,02	0,51
Na (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,09	0,03	0,06	0,15
Sat (%)	7,5	5,4	2,4	21,1

El estudio de los parámetros relacionados con la actividad y biomasa de los microorganismos del suelo (Tabla 6) es fundamental para conocer la actividad metabólica del suelo responsable de procesos capitales como la mineralización y humificación de la materia orgánica (García *et al.*, 2003). La respiración del suelo es uno de los parámetros más utilizados para cuantificar la actividad microbiana de los suelos (Alef, 1995). El estudio de la biomasa microbiana es interesante porque aparte de tratarse de una fracción muy activa del suelo al intervenir en los procesos de mineralización constituye en sí misma una reserva importante de nutrientes que al morir quedan disponibles para el resto de organismos (Jenkinson and Ladd, 1981). El cociente metabólico (qCO₂) da idea de la eficiencia metabólica de los microorganismos edáficos de manera que a menor valor de qCO₂ los organismos presentan una mayor eficiencia (Anderson and Domsch, 1993). Mahía *et al.* (2006) hallaron una relación significativa entre la calidad de estación y valores elevados de parámetros bioquímicos del suelo en masas de *Pinus sylvestris* L. y *Pinus pinaster* Ait. en Galicia.

Tabla 6. Media, desviación típica, valor mínimo y máximo que presentan los parámetros edáficos bioquímicos analizados en las parcelas de estudio. (Cmic: C microbiano; Nmic: N microbiano; CT: C total; Cmin: C mineralizable; Nmin: N mineralizable; Pmic: P microbiano).

Parámetros Bioquímicos	Media	Desviación típica	Mínimo	Máximo
Cmic (mg·kg⁻¹)	115,1	47,8	45,5	232,9
Nmic (mg·kg⁻¹)	14,0	7,2	3,6	30,7
Cmic/CT (g·kg⁻¹)	2,96	1,24	1,30	6,13
Cmic/Nmic (mg·mg⁻¹)	9,1	3,3	4,5	20,6
Cmin (mg·kg⁻¹·semana⁻¹)	28,3	10,7	11,0	56,1
Nmin (mg·kg⁻¹·semana⁻¹)	7,6	5,8	0,3	26,0
Cmin/CT (g·semana⁻¹·kg⁻¹)	0,8	0,3	0,3	1,6
Cmin/Nmin (g·g⁻¹)	14,0	34,2	0,8	193,5
Pmic (mg·kg⁻¹)	4,4	2,6	1,6	14,6
qCO₂ (Cmin/Cmic) (g·semana⁻¹·g⁻¹)	0,3	0,1	0,1	0,6

La hojarasca y ramas depositadas en la superficie del suelo que dan origen al horizonte orgánico (Tabla 7) son, junto a las raíces muertas, la fuente de materia orgánica del suelo (Binkley, 1993). El estudio de sus características es imprescindible cuando se aborda el estudio de la calidad de un suelo. La relación C/N del horizonte orgánico es indicativa de la calidad del humus y de la velocidad de mineralización de los nutrientes de manera que, a menor valor de la relación C/N se produce una mineralización más rápida. En general la hojarasca proveniente de especies de los géneros *Pinus*, *Calluna* o *Erica* provoca una acidificación del humus y por tanto del suelo. La relación C/N que suelen presentar es superior al 50% debido a los bajos contenidos en N (Cobertera, 1993).

Tabla 7. Media, desviación típica, valor mínimo y máximo que presentan los parámetros analizados en el horizonte orgánico para las parcelas de estudio. (L: fracción *litter*; FH: fracción fragmentada más humificada; O_L/O_{FH}: biomasa de fracción L/FH del horizonte orgánico; CT: carbono total; NT: nitrógeno total).

Parámetros Horizonte Orgánico	Media	Desviación típica	Mínimo	Máximo
Espesor horizonte Orgánico (cm)	5,1	1,8	2,1	10,0
O_{FH} (t ms·ha⁻¹)	185,2	62,3	100,6	346,3
O_L (t ms·ha⁻¹)	58,6	23,5	32,7	128,1
[CT/NT]_L	69,5	10,2	48,5	90,8
[CT/NT]_{FH}	38,1	5,0	28,6	52,1

Métodos estadísticos

Se ha aplicado un Análisis de Componentes Principales (ACP) sobre las variables estudiadas agrupadas por su tipo (topográficas, climáticas, edáficas físicas, edáficas químicas, edáficas bioquímicas y relativas al horizonte orgánico) para reducir la dimensionalidad de los datos. La finalidad de este análisis es seleccionar aquellas variables no correlacionadas entre sí que recojan la mayor variabilidad de los datos. El

ACP se ha efectuado por grupos de variables ya que se considera que las correlaciones existirán mayoritariamente entre variables del mismo tipo. Se ha tomado como criterio combinado de elección del número de componentes principales a considerar en cada análisis que el conjunto de las mismas recoja al menos el 70% de la varianza y que los autovalores de dichas componentes sean superiores a la unidad. De cada una de éstas componentes se ha escogido aquella variable que ha presentado el coeficiente de mayor valor absoluto.

Se ha comprobado la normalidad de las variables seleccionadas a través del ACP mediante el test Shapiro-Wilks y se han realizado transformaciones sobre aquellas variables que no presentaban una distribución normal. Las variables que no presentaban una distribución normal aun habiendo sido transformadas se han excluido del Análisis Discriminante.

A continuación se ha utilizado el coeficiente de correlación de Pearson para analizar las correlaciones existentes entre las variables topográficas, edáficas y climáticas seleccionadas entre sí para no introducir en un mismo modelo dos variables fuertemente correlacionadas.

Finalmente, mediante Análisis Discriminante se ha buscado un modelo capaz de predecir la clase de calidad de estación a partir de algunos de estos parámetros topográficos, edáficos y climáticos seleccionados. El Análisis Discriminante es una técnica de clasificación a través de la cual se logra la asignación de un individuo a un grupo conocidas sus características. Partiendo de una serie de grupos definidos (calidades de estación) integrados por individuos (parcelas de estudio) que presentan unos valores conocidos para una serie de variables (climáticas, topográficas y edáficas), el Análisis Discriminante establece funciones discriminantes (una para cada grupo) que permiten clasificar nuevos individuos (nuevos rodales) dentro de dichas clases a través de los valores que toman en estas variables. Dichas funciones discriminantes calculan la distancia entre las observaciones y los grupos de manera que las nuevas observaciones son asignadas al grupo con el que guarden una menor distancia.

La estructura general de este tipo de modelos es la que sigue:

$$\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot X_i$$

Siendo $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ los coeficientes obtenidos y X_i los valores que toman las n variables utilizadas como predictores (Hair *et al.*, 1999). Esta técnica ha sido utilizada en varios trabajos similares con anterioridad (Bravo and Montero, 2001; Bravo *et al.*, 2011; Bravo-Oviedo and Montero, 2005; Harding *et al.*, 1985). Los datos de las 35

parcelas han sido utilizados tanto para ajustar el modelo como para evaluarlo. El Análisis Discriminante se ha evaluado mediante validación cruzada. Esta técnica consiste en la reestimación del modelo excluyendo cada vez una de las observaciones y clasificando dicha observación con el modelo en cuyo ajuste no ha intervenido.

Todos estos procedimientos se han realizado con el paquete estadístico STATGRAPHICS® Centurion XVI (STATGRAPHICS, 2009).

RESULTADOS

Selección de variables

El ACP realizado sobre las variables topográficas revela que la primera componente principal recoge el 65,66 % de la varianza, con un autovalor de 1,97 y la segunda un 31,55 % con un autovalor de 0,95. Ya que sólo se cuenta con tres variables topográficas y la intención de este análisis es reducir la dimensionalidad de los datos se opta por limitar el número de componentes principales seleccionadas a una. El coeficiente de la función de dicha componente principal para el parámetro latitud es el de mayor valor absoluto (0,6923) por lo que esta variable ha sido la seleccionada. Los coeficientes de dicha función para la altitud y la pendiente son respectivamente 0,6816 y -0,2367.

Para el conjunto de variables edáficas físicas estudiadas se seleccionaron las cuatro primeras componentes principales, considerando los datos expuestos en la Tabla 8 y los criterios de selección establecidos.

Tabla 8. Autovalores y porcentaje de varianza recogido por las cinco primeras componentes principales para las variables edáficas físicas estudiadas.

Número de componente	Autovalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje de Varianza Acumulado
1	6,29969	48,459	48,459
2	1,94235	14,941	63,400
3	1,66438	12,803	76,203
4	1,16041	8,926	85,129
5	0,939555	7,227	92,357

Se seleccionan las variables Arena_i, Gruesos y Porosidad (Tabla 9) por ser representativas de las tres primeras componentes principales, que por si mismas explican el 76,2 % de la varianza. De la cuarta componente principal no se consideró ninguna variable ya que las que presentaron los mayores coeficientes en valor absoluto son la Dap y la Dr, cuya contribución se halla ya recogida por la Porosidad ya seleccionada en la tercera componente.

Tabla 9. Coeficientes para las funciones de las cuatro primeras componentes principales para las variables edáficas físicas. (CM: coeficiente de marchitamiento; CC: capacidad de campo; AU: agua útil; Dap: densidad aparente; Dr: densidad real; Arena/Limo: arena/limo según el criterio International Society of Soil Science; Arena_{USDA}/Limo_{USDA}: arena/limo según el criterio United States Department of Agriculture.)

	Componente	Componente	Componente	Componente
	1	2	3	4
CM (%)	0,296398	-0,173772	0,00282175	-0,235286
CC (%)	0,368963	0,111419	-0,00318029	-0,0242874
AU (%)	0,295952	0,314599	-0,00629074	0,169805
Dap (g·cm⁻³)	-0,11333	-0,0578345	-0,594742	0,433344
Dr (g·cm⁻³)	0,103738	-0,123138	0,261976	0,788537
Porosidad (%)	0,165872	-0,0561492	0,686768	0,140569
Gruesos (%)	-0,230211	-0,559134	0,0653115	-0,027229
Finos (%)	0,230321	0,558937	-0,0655497	0,0274151
Arcilla (%)	0,170316	-0,0840899	0,132399	-0,269577
Limo_i (%)	0,364241	-0,170591	-0,161533	-0,0163789
Arena_i (%)	-0,37217	0,175465	0,124528	0,0680651
Limo_{USDA} (%)	0,334226	-0,268562	-0,149549	0,0747843
Arena_{USDA} (%)	-0,345495	0,269495	0,126041	-0,0349412

En vista de los autovalores y porcentajes de varianza de las componentes principales del análisis de las variables edáficas químicas que se presentan en la Tabla 10, se seleccionan las cinco primeras componentes principales.

Tabla 10. Autovalores y porcentaje de varianza recogido por las seis primeras componentes principales para las variables edáficas químicas estudiadas.

Número de componente	Autovalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje de Varianza Acumulado
1	8,63769	39,262	39,262
2	4,94965	22,498	61,761
3	2,56036	11,638	73,399
4	1,28964	5,862	79,261
5	1,15244	5,238	84,499
6	0,74277	3,376	87,875

Dados los coeficientes que presentan las variables edáficas químicas para las cinco primeras componentes principales (Tabla 11), se seleccionan las siguientes variables: Sat, CFO, Al_i, Al_E y CT/NT.

Tabla 11. Coeficientes para las funciones de las cinco primeras componentes principales para las variables edáficas químicas. (AC: acidez de cambio; Fe_A: formas amorfas de Fe; Al_A: formas amorfas de Al; Mn_A: formas amorfas de Mn; Al_E: Al intercambiable; Al_I: Al inorgánico; Fe_M: formas de Fe complejadas con la materia orgánica; Al_M: formas de Al complejadas con la materia orgánica; Mn_M: formas de Mn complejadas con la materia orgánica; CCC: capacidad de cambio catiónico; CFO: Carbono fácilmente oxidable; CT: carbono total; NT: nitrógeno total; Pas: fósforo asimilable; Sat: saturación de bases).

	Componente	Componente	Componente	Componente	Componente
	1	2	3	4	5
AC (cmol+)/(kg)	0,26341	-0,214238	0,0541644	-0,138153	0,122899
Al_A (mg/g)	0,183965	-0,155987	-0,441698	0,159676	0,0345512
Al_E (mg/kg)	0,157013	0,131276	0,324753	0,375159	-0,0510592
Al_I (mg/g)	0,177804	-0,153049	-0,452166	0,151441	0,0391338
Al_M (mg/g)	0,254729	-0,127021	0,129966	0,340845	-0,104172
Ca (cmol+)/(kg)	-0,285923	-0,187509	-0,00693814	0,0322442	0,12723
CCC (cmol+)/(kg)	0,186985	-0,297631	0,105055	-0,29362	0,0373642
CFO (%)	0,165319	-0,346613	0,09721	-0,139199	0,148387
CFO/CT	0,0101808	-0,264277	0,210933	-0,00330588	-0,434699
CT/NT	0,200332	0,154723	-0,0399771	-0,223865	0,536212
Fe_A (mg/g)	0,0985132	-0,220793	-0,439037	0,255812	0,0191611
Fe_M (mg/g)	0,246843	-0,195933	0,0887845	0,223333	-0,217032
K (cmol +)/(kg)	-0,235246	-0,196842	0,141854	-0,00223684	-0,0136541
Mg (cmol+)/(kg)	-0,293299	-0,168302	0,0413591	0,0228284	0,0752119
Mn_A (mg/g)	-0,241014	-0,00270966	-0,20877	0,243109	0,0867404
Mn_M (mg/g)	-0,306629	-0,0779146	-0,0105563	0,0919385	0,0491851
MO t (%)	0,0775914	-0,34615	0,170155	0,0317125	0,335706
Na (cmol+)/(kg)	0,0227081	-0,255397	0,294286	0,285893	0,334517
Pas (mg/kg)	-0,184383	-0,240867	-0,112978	-0,358243	0,00559565
pH	-0,293908	-0,144898	0,0283195	0,230017	0,0556034
Pmic (mg/kg)	-0,0495385	-0,31359	-0,113051	-0,23463	-0,383253
Sat bases (%)	-0,312819	-0,11236	-0,0215542	0,127952	0,121493

Considerando los autovalores y porcentajes de varianza que presentan las componentes de análisis de parámetros edáficos bioquímicos recogidos en la Tabla 12 se seleccionan las tres primeras componentes principales.

Tabla 12. Autovalores y porcentaje de varianza recogido por las cuatro primeras componentes principales para las variables edáficas bioquímicas estudiadas.

Número de componente	Autovalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje de Varianza Acumulado
1	3,78145	47,268	47,268
2	2,43504	30,438	77,706
3	1,12971	14,121	91,827
4	0,319525	3,994	95,821

Las tres variables bioquímicas seleccionadas a partir de los coeficientes de las funciones de las tres primeras componentes principales son Cmic, Cmin/CT y Cmic/Nmic (Tabla 13).

Tabla 13. Coeficientes para las funciones de las tres primeras componentes principales para las variables edáficas bioquímicas (Cmic: C microbiano; Nmic: N microbiano; P mic: P microbiano; Cmin: C mineralizable; N min: N mineralizable; CT: carbono total).

	Componente	Componente	Componente
	1	2	3
Cmic/Nmic	0,0883256	0,238635	-0,85008
Cmin (mg C-CO₂ / kg suelo seco y	-0,15174	-0,567713	-0,183548
Cmin/CT	-0,104297	-0,590929	-0,216053
Cmic (mg/kg suelo)	-0,496799	0,0467165	-0,151241
Cmic/CT	-0,471531	-0,0663493	-0,236745
Nmic (mg/kg suelo)	-0,450728	-0,159897	0,338694
qCO₂(Cmin/Cmic)	0,349057	-0,417827	-0,0533259
Pmic (ppm)	-0,405151	0,254612	-0,0227137

Dados los autovalores y porcentajes de varianza recogidos por las componentes principales del análisis de las variables del horizonte orgánico estudiadas (Tabla 14) se han seleccionado las tres primeras componentes principales.

Tabla 14. Autovalores y porcentaje de varianza recogido por las cuatro primeras componentes principales para las variables del horizonte orgánico estudiadas.

Número de componente	Autovalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje de Varianza Acumulado
1	1,76779	35,356	35,356
2	1,20119	24,024	59,380
3	1,01014	20,203	79,582
4	0,600745	12,015	91,597

Dados los coeficientes hallados para las tres primeras componentes principales del análisis de las variables del horizonte orgánico (Tabla 15) se han seleccionado las siguientes variables: [CT/NT]_{FH}, Esp O, [CT/NT]_L.

Tabla 15. Coeficientes para las funciones de las tres primeras componentes principales para las variables del horizonte orgánico estudiadas ([CT/NT]_{FH}: relación C total/N total de las fracciones fragmentada más humificada del horizonte orgánico; [CT/NT]_L: relación C total/N total de la fracción "litter" del horizonte orgánico; O_L: biomasa de fracción "litter" del horizonte orgánico; O_{FH}: biomasa de las fracciones fragmentada más humificada del horizonte orgánico; Esp O: espesor del horizonte orgánico).

	Componente	Componente	Componente
	1	2	3
[CT/NT]_{FH}	0,573831	-0,053972	0,366122
[CT/NT]_L	0,29935	0,495166	0,614956
Esp O (cm)	-0,227895	-0,68426	0,437353
O_{FH} (t ms/ha)	-0,51354	-0,00236789	0,543714
O_L (t ms/ha)	-0,515217	0,532616	0,0296754

En vista de los resultados presentados en la Tabla 16, se han seleccionado las dos primeras componentes principales.

Tabla 16. Autovalores y porcentaje de varianza recogido por las tres primeras componentes principales para las variables climáticas estudiadas.

Número de componente	Autovalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje de Varianza Acumulado
1	13,961	82,124	82,124
2	2,35537	13,855	95,979
3	0,529172	3,113	99,092

Dados los coeficientes de las funciones de las dos primeras componentes principales para las variables climáticas (Tabla 17) se han seleccionado el Índice de Lang y la Tmmb.

Tabla 17. Coeficientes de las funciones de las dos primeras componentes principales para las variables climáticas estudiadas (P: precipitación; Pa: precipitación anual; Tma: temperatura media anual; Tmmb: temperatura media mensual más baja; Tmma: temperatura media mensual más alta; Tminf: temperatura media de las mínimas del mes más frío; Tmaxc: temperatura media de las máximas del mes más cálido; ETP: evapotranspiración potencial; ETR: evapotranspiración real; Im: Índice hídrico anual).

	Componente	
	1	2
P invierno (mm)	0,252082	0,190727
P primavera (mm)	0,244675	0,191656
P verano (mm)	0,245946	0,103838
P otoño (mm)	0,253948	0,184264
Pa (mm)	0,255506	0,184968
Tma (°C)	-0,239748	0,283733
Tmmb (°C)	-0,194792	0,438607
Tmma (°C)	-0,249935	0,211982
Tminf (°C)	-0,243225	0,257473
Tmaxc (°C)	-0,208847	0,371881
ETP (mm)	-0,234133	0,31436
ETR (mm)	0,177988	0,408927
Déficit (mm)	-0,259058	-0,0413958
Superávit (mm)	0,257474	0,144747
Im	0,260524	0,125543
Índice Martonne	0,261275	0,124112
Índice Lang	0,26386	0,075268

En resumen, tras los Análisis de Componentes Principales realizados sobre los seis conjuntos de variables que se han estudiado (topográficas, edáficas físicas, edáficas químicas, edáficas bioquímicas, edáficas del horizonte orgánico, climáticas) se seleccionaron en un primer momento 17 variables: Latitud, Arena_i, Gruesos, Porosidad, Sat, CFO, Al_i, Al_E, CT/NT, Cmic, Cmin/CT, Cmic/Nmic, [CT/NT]_{FH}, Esp O, [CT/NT]_L, Índice de Lang, Tmmb.

Mediante el test Shapiro-Wilk se ha analizado la normalidad de las variables seleccionadas. Se rechaza la hipótesis nula de normalidad de las siguientes variables a un nivel de confianza del 95%: Sat, Al_i, Al_E, Cmin/CT, Cmic/Nmic, Tmmb. Se han probado transformaciones de estas variables que no presentan una distribución normal

(Log (X), Log (X+1), Ln (X), exp (X), 1/X, X², √X) pero dichas transformaciones tampoco presentaban una distribución normal.

Para evitar la pérdida de información al no tener en consideración estas variables que no presentan una distribución normal se ha tratado de sustituir algunas de ellas por otras descartadas en el Análisis de Componentes Principales, en especial el Al_E y la saturación de bases porque se considera que pueden contener información interesante acerca de la disponibilidad de nutrientes. Como se presentó en la Tabla 11 la saturación de bases aparecía en la misma componente principal que el Ca, Mg, pH y AC variables que se consideran igualmente interesantes para el análisis. De ellas, solamente la AC presenta una distribución normal. Asimismo, el Al_E aparecía en la misma componente principal que el Pas variable que sí presenta una distribución normal.

Por tanto, las variables que se han considerado en el Análisis Discriminante han sido las 13 siguientes: Latitud, Arena_i, Gruesos, Porosidad, AC, CFO, Pas, CT/NT, Cmic, [CT/NT]_{FH}, Esp O, [CT/NT]_L e Índice de Lang.

La Tabla 18 contiene la matriz de correlaciones para las trece variables que han sido seleccionadas a través del análisis de componentes principales. Como se puede observar, la AC está fuertemente correlacionada con el CFO, el Cmic con el Pas y la Latitud está fuertemente correlacionada con el Índice de Lang. Estas correlaciones se han tenido en cuenta a la hora de combinar dichas variables en el Análisis Discriminante de manera que no apareciesen en un mismo modelo dos de estas variables fuertemente correlacionadas.

Tabla 18. Matriz de correlaciones para las 13 variables seleccionadas utilizando el coeficiente de correlación de Pearson [AC: Acidez de cambio (cmol₍₊₎.kg⁻¹); Arena_i: arena criterio ISSS (%); CFO: C fácilmente oxidable (%); Cmic: C microbiano (mg.kg⁻¹); CT/NT: C total/N total; CT/NT FH: C total/Ntotal fracciones fragmentada más humificada del horizonte orgánico; CT/NT L: C total/Ntotal fracción "litter" del horizonte orgánico; Esp O: espesor del horizonte orgánico (cm); Gruesos: elementos gruesos (%); I Lang: índice de Lang; Latitud: latitud (°); Pas: P asimilable (mg.kg⁻¹); Porosidad: porosidad (%).]

	AC	Arena _i	CFO	Cmic	CT/NT	CT/NT FH	CT/NT L	Esp O	Grues	I Lang	Lat	Pas	Porosidad
AC	1,000	0,038	0,779	0,094	0,343	0,125	0,235	0,410	-0,298	0,560	0,582	-0,153	0,050
Arena _i		1,000	-0,179	-0,518	0,650	0,254	0,124	0,144	0,371	0,212	0,355	-0,235	-0,260
CFO			1,000	0,411	0,186	-0,134	0,273	0,302	-0,249	0,511	0,429	0,181	0,089
Cmic				1,000	-0,469	-0,080	0,037	-0,051	-0,363	-0,224	-0,304	0,715	0,075
CT/NT					1,000	0,218	0,369	0,048	0,101	0,384	0,500	-0,386	-0,270
[CT/NT] _{FH}						1,000	0,293	-0,096	-0,178	0,084	0,260	-0,177	0,390
[CT/NT] _L							1,000	-0,161	-0,094	0,071	0,237	-0,112	-0,044
Esp O								1,000	0,096	0,416	0,427	0,006	0,001
Gruesos									1,000	-0,188	-0,144	-0,111	-0,115
I Lang										1,000	0,927	-0,339	0,106
Latitud											1,000	-0,415	0,110
Pas												1,000	0,028
Porosidad													1,000

A continuación se presentan los modelos discriminantes que se han ensayado:

- (1) Constante + Latitud + Porosidad + AC + Cmic + [CT/NT]_{FH}
- (2) Constante + Latitud + Gruesos + CT/NT + AC + Esp O
- (3) Constante + I Lang + Porosidad + AC + Cmic + Esp O**
- (4) Constante + I Lang + Porosidad + CFO + Cmic + [CT/NT]_L
- (5) Constante + Latitud + Arena_i + Pas + CT/NT + Esp O
- (6) Constante + Latitud + Arena_i + AC + Cmic
- (7) Constante + Latitud + Porosidad + Pas + [CT/NT]_L
- (8) Constante + I Lang + Porosidad + CFO + Esp O
- (9) Constante + Latitud + Gruesos + CT/NT + Esp O
- (10) Constante + I Lang + Gruesos + Pas + [CT/NT]_L
- (11) Constante + Latitud + Pas + [CT/NT]_{FH}
- (12) Constante + I Lang + Porosidad + Cmic
- (13) Constante + Latitud + Porosidad + Pas
- (14) Constante + AC + Cmic + [CT/NT]_L
- (15) Constante + Latitud + Pas + Esp O

Como ya se ha comentado con anterioridad todas las variables presentan distribuciones normales y se han combinado de manera que no presenten fuertes correlaciones entre sí. Los datos de las 35 parcelas han sido utilizados tanto para ajustar el modelo como para evaluarlo mediante validación cruzada. El error que se estima por este procedimiento es infravalorado.

El porcentaje de casos correctamente clasificados por los modelos aumenta a medida que se incluyen un mayor número de variables de manera que los modelos que incluyen cinco variables son los que mejor discriminan. Los errores cometidos en la clasificación por los quince modelos ensayados están comprendidos entre el 22,86% y el 45,71%.

El modelo 3 es el que presenta un porcentaje de casos correctamente clasificados más alto, concretamente del 77,14%. En la Tabla 19 se muestran los resultados de la validación cruzada del modelo 3. Como se puede observar las parcelas de la clase 15 son clasificadas correctamente en un 78,57% de los casos, mientras que los errores en la clasificación de esta clase son asignados a la clase

contigua (clase 18). En cuanto a la clase 18 el porcentaje de parcelas clasificadas correctamente es del 75% y los casos mal clasificados son asignados a la clase inferior (clase 15). En el caso de la clase 21 el porcentaje de casos correctamente clasificados es del 76,92% y para esta clase de calidad, los casos mal clasificados son asignados a ambas clases inferiores. Por todo esto, se selecciona el modelo 3 para la discriminación de la clase de calidad de las masas de *Pinus sylvestris* L. en la zona de Páramos de León y Palencia. Cabe destacar que ninguna de las parcelas de las calidades inferiores son asignadas a la clase 21.

Tabla 19. Validación cruzada del modelo de calidad de estación 3.

Clase de calidad real	Clase de calidad predicha		
	15	18	21
15	78,57%	21,43%	0,00%
18	25,00%	75,00%	0,00%
21	15,38%	7,69%	76,92%

En la Tabla 20 se presentan los coeficientes de las funciones de clasificación para la calidad de estación según el modelo 3.

Tabla 20. Coeficientes de las funciones de clasificación para la calidad de estación de *Pinus sylvestris* L. en la zona de Páramos de León y Palencia según el modelo 3 [I Lang: índice de Lang; Porosidad: porosidad (%); AC: Acidez de cambio ($\text{cmol}_{(+)}, \text{kg}^{-1}$); Cmic: C microbiano ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); Esp O: espesor del horizonte orgánico (cm)].

	15	18	21
I Lang	0,940287	1,06421	1,0329
Porosidad	1,17163	1,15597	1,34921
AC	-0,899286	-0,813033	-1,03295
Cmic	0,148903	0,148922	0,179595
Esp O	1,15441	0,75858	1,51682
CONSTANTE	-67,828	-76,0162	-87,6918

DISCUSIÓN

El modelo seleccionado para la predicción de la calidad de estación de las masas de *Pinus sylvestris* L. de León y Palencia incluye las variables latitud, porosidad, acidez de cambio, C microbiano y el espesor del horizonte orgánico. Dichas variables representan todas las facetas del medio que pueden estar afectando al crecimiento del árbol: el clima (I Lang), el medio físico del suelo (Porosidad) y los nutrientes (AC, Cmic y Esp O).

Las relaciones entre elementos del clima (precipitación y temperatura, entre otros) han sido frecuentemente utilizados para expresar de forma cuantitativa la influencia del clima sobre las comunidades vegetales (Porta *et al.*, 2003). El parámetro climático que incluye el modelo seleccionado es el Índice de Lang, índice fácilmente obtenible ya que consiste en la relación entre la precipitación anual y la temperatura

media anual, y que además ha gozado siempre de gran interés entre climatólogos y edafólogos (Capel-Molina, 1982). La correlación existente entre este parámetro y el índice de sitio es positiva, y en las funciones discriminantes del modelo aparece de igual modo con signo positivo lo que indica que a mayor valor de dicho índice, es decir, a mayor relación entre las precipitaciones y las temperaturas, aumenta la calidad del sitio para la especie objeto de estudio. En todas las parcelas el valor del Índice de Lang es superior a 40, límite entre zonas húmedas y áridas. Este parámetro está fuertemente correlacionado con la latitud, de manera que la calidad de la estación aumenta a mayores latitudes. Todo esto es lógico al tratarse de la especie *Pinus sylvestris* L. que se encuentra en la Península Ibérica al límite meridional de su distribución.

La porosidad es el parámetro que incluye en el modelo información acerca del medio físico del suelo. Aúna información acerca de la textura y la estructura edáfica. Es un parámetro determinante del régimen de humedad y aireación del suelo. Sin embargo, no se trata de un parámetro cuantitativamente relacionado con la aireación del suelo ya que el tamaño de dichos poros es determinante. Puede tratarse de un suelo con un elevado volumen de poros pero ser estos de pequeño tamaño y por tanto, no ser accesibles para el aire. Sin embargo, los suelos con texturas francas, como es el caso de los suelos objeto de estudio, presentan una porosidad equilibrada en cuanto a macro y microporos (Cobertera, 1993).

La faceta nutricional del modelo está representada por los tres parámetros restantes: espesor del horizonte orgánico, acidez de cambio y C de la biomasa microbiana.

El parámetro relacionado con el horizonte orgánico representa las entradas de nutrientes al suelo ya que la hojarasca depositada sobre el suelo junto con las raíces muertas constituyen el principal aporte de nutrientes al suelo, y junto con su microflora y fauna constituyen la fase verdaderamente dinámica del ambiente forestal (Pritchett, 1986). Se considera muy interesante su inclusión en el modelo por su fácil determinación. La acumulación de hojarasca sobre el suelo forestal está en función de la cantidad anual de hojarasca caída menos la tasa anual de descomposición. La cantidad y características de la capa de hojarasca depende en gran medida del grado de descomposición de los aportes de hojarasca. Esta tasa de descomposición está determinada por la naturaleza física y química del tejido fresco, las condiciones de aireación, temperatura y humedad de la cubierta, así como los tipos y cantidades de microflora y fauna presentes (Pritchett, 1986). El espesor de la capa de hojarasca está influida no sólo por la tasa anual de descomposición y el aporte sino también por la edad que tenga la cubierta forestal o el que haya transcurrido a partir del último

incendio o de cualquier otra perturbación. Wells (1971) indicó que se llega a un estado casi de equilibrio en el que el ritmo de descomposición es aproximadamente igual al aporte anual de materiales orgánicos.

El C microbiano, por su parte, es un parámetro que recoge información acerca de una importante fuente de nutrientes, como es la biomasa microbiana. Los microorganismos del suelo al morir dejan a disposición del resto de organismos los nutrientes que contienen.

Los árboles de los bosques requieren los mismos elementos para su crecimiento y reproducción que otras plantas superiores, pero debido a la naturaleza conservadora de la recirculación de nutrientes y al arraigamiento profundo de la mayoría de los árboles, así como a la capacidad obvia de las raíces micorrizales para extraer algunos nutrientes mínimamente disponibles de los suelos, las deficiencias en nutrientes no son comunes en los bosques (Pritchett, 1986). No obstante algunos estudios en el Norte y Noroeste de España han mostrado importantes problemas nutricionales en rodales de distintas masas de pinos, principalmente debidos al P en suelos ácidos (Brañas *et al.*, 2000; Sánchez-Rodríguez *et al.*, 2002; Zas and Serrada 2003; Romanyá and Vallejo, 2004; Afif-Khoury *et al.*, 2010). Esta propiedad edáfica es importante en la zona objeto de estudio debido a la marcada acidez que presentan los suelos. Se trata de un parámetro relacionado con la disponibilidad de nutrientes frecuentemente limitantes como el P y que a su vez influye sobre las poblaciones de microorganismos y su actividad (Binkley, 1993).

Son numerosos los trabajos desarrollados hasta la fecha que relacionan la calidad de estación con parámetros del medio. Aquellos que tienen a *Pinus sylvestris* L. como especie objeto de estudio son menos numerosos (Bravo and Montero, 2001; Hökkä and Ojansuu, 2004; Sharma *et al.*, 2012) que los que se centran en especies más productivas como *Pinus pinaster* Ait. (Pacheco, 1991; Bravo-Oviedo *et al.*, 2010; Álvarez-Álvarez *et al.*, 2011; Bravo-Oviedo *et al.*, 2011) o *Pinus radiata* D. Don (Turner and Holmes, 1985; Gerding y Schlatter, 1995; Rodríguez *et al.*, 2002; Romanyà and Vallejo, 2004; Sánchez- Afif-Khoury *et al.*, 2010). También han sido objeto de este tipo de trabajos *Pinus pinea* L. tanto en España (Bravo-Oviedo and Montero, 2005) como en Italia (Bravo *et al.*, 2011), *Picea abies* (L.) Karst. (Seynave *et al.*, 2005; Sharma *et al.*, 2012), *Picea glauca* (Moench) Voss. (Wang and Klinka, 1996), *Picea engelmannii* Parry ex Engelmann x *Picea glauca* (Moench) Voss. (Kayahara *et al.*, 1998); *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (Corona *et al.*, 1998; Dunbar *et al.*, 2002; Fontes *et al.*, 2003 ; Nigh, 2006), *Populus tremuloides* Michx. (Chen *et al.*, 1998; Chen *et al.*, 2002), *Pinus contorta* Doug. ex Loud. (Kayahara *et al.*, 1998; Szwaluk and Strong,

2003), *Pinus strobus* L. (Brown, 2007) y *Gmelina arborea* Roxb., *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake y *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden (Henri, 2001).

En el presente trabajo se ha desarrollado un modelo que incluye parámetros climáticos, edáficos físicos, químicos y bioquímicos y relacionados con el horizonte orgánico. Los estudios desarrollados hasta la fecha con frecuencia incluyen solamente dos de estos factores, siendo uno de ellos habitualmente relacionado con las propiedades físicas del suelo (Gerding and Schlatter, 1995; Bravo and Montero, 2001; Sánchez-Rodríguez *et al.*, 2002; Bravo-Oviedo and Montero, 2005; Afif-Khoury *et al.*, 2010; Álvarez-Álvarez *et al.*, 2011; Bravo *et al.*, 2011; Bravo-Oviedo *et al.*, 2011). Los menos frecuentes incluyen tres o incluso cuatro de estos parámetros (Pacheco, 1991; Romanyà and Vallejo, 2004) y tienen en común la inclusión de parámetros edáficos tanto físicos como químicos. Solamente Romanyà and Vallejo (2004) incluyen parámetros relacionados con el horizonte orgánico al igual que el modelo que se desarrolla en el presente trabajo.

Solamente uno de estos trabajos está desarrollado sobre *Pinus sylvestris* L. en España, concretamente en las masas de la cuenca del Ebro (Bravo and Montero, 2001). En este trabajo desarrollaron una regla discriminante capaz de clasificar con una tasa de clasificaciones correctas del 61,11% partiendo solamente de tres variables: el contenido en limo y arcilla del suelo mineral y la capacidad de cambio catiónico. Dichos parámetros texturales incluía asimismo el modelo discriminante desarrollado por Bravo-Oviedo and Montero (2005) para *Pinus pinea* L. en el sudoeste de España. Este modelo además del contenido en limo y arcilla incluía la altitud y conseguía un 75% de clasificaciones correctas. Para *Pinus pinea* L. en Calabria (Italia), Bravo *et al.* (2011) elaboraron un modelo discriminante que presentaba una tasa de error del 38,89% a partir de dos únicas variables del medio: el contenido en arcilla y la pendiente. Es frecuente, por tanto, la inclusión de parámetros texturales como el contenido en arcilla en este tipo de modelos así como la pendiente o altitud como parámetros topográficos (Bravo-Oviedo and Montero, 2005; Bravo *et al.*, 2011; Bravo-Oviedo *et al.*, 2011). En el presente trabajo dichos parámetros no han sido incluidos en los modelos ya que los valores obtenidos para los mismos son muy similares para todas las parcelas y en el caso de la pendiente además se presentan valores muy bajos. Sin embargo, se ha tenido en consideración el parámetro porosidad que incorpora información acerca de la textura y estructura del suelo, parámetro determinante del régimen de humedad y aireación del mismo y de capital importancia para la actividad biológica que éste pueda soportar.

Para las masas españolas de *Pinus pinaster* Ait. Bravo-Oviedo *et al.* (2011) desarrollaron dos modelos para la predicción del índice de sitio. El primer modelo

explicaba el 55,2% de la variación del índice de sitio a partir de la altitud, la precipitación de otoño e invierno y la temperatura media anual y el segundo el 56,6% teniendo como predictores la altitud, la precipitación de otoño e invierno y el contenido en arcilla. Para esta misma especie en Portugal, Pacheco (1991) elaboró un modelo de predicción del índice de sitio que incluía como variables predictoras la temperatura mínima de otoño, el P asimilable, la porosidad y el contenido en arena del suelo mineral explicando así el 54,4% de la variabilidad del índice de sitio. Álvarez-Álvarez *et al.* (2011) encontraron que la profundidad del suelo y la temperatura media del verano eran los factores principales que explicaban la productividad de *Pinus pinaster* Ait. en Asturias.

Romanyà and Vallejo (2004) desarrollaron modelos de predicción del índice de sitio tanto para las masas mediterráneas como atlánticas de *Pinus radiata* D. Don en España. El modelo que mejor predice el índice de sitio en ambos tipos de masas incluye el aporte anual de hojarasca, el contenido en N del horizonte orgánico, el K, la relación C/N de la fracción L del horizonte orgánico, la altitud, el pH, la profundidad del suelo, el Ca y la relación C/N del suelo mineral. Sánchez-Rodríguez *et al.* (2002) en *Pinus radiata* D. Don en el noroeste de España encontraron que las variables edáficas que mejor explican las diferencias en crecimiento son el N total, la profundidad del suelo, la acidez y el Mg intercambiable. Affif-Khoury *et al.* (2010) estudiaron la relación existente entre el índice de sitio de *Pinus radiata* D. Don en Asturias con algunos parámetros edáficos y foliares y hallaron que se encontraba positivamente correlacionado con el K intercambiable del suelo y negativamente con la pendiente. Gerding and Schlatter (1995) en su estudio sobre *Pinus radiata* D. Don en Chile encontraron que el principal factor que determina la variabilidad en la productividad de dicha especie es el régimen de humedad, representado por factores climáticos y factores edáficos físicos. En los estudios realizados sobre *Pinus radiata* D. Don es frecuente, por tanto, encontrar parámetros químicos relacionados con el contenido en nutrientes del suelo. Esto es porque dicha especie es muy exigente en nutrientes (Romanyà and Vallejo, 2004).

Mahía *et al.* (2006) estudiaron las masas de *Pinus sylvestris* L. y *Pinus pinaster* Ait. del noroeste de España y al igual que en el presente trabajo, encontraron mayores valores de parámetros bioquímicos como C microbiano o qCO₂ en aquellas masas que presentaban mayor índice de sitio. Asimismo hallaron un efecto significativo del índice de sitio sobre el C de la biomasa microbiana en las masas de *Pinus sylvestris* L. de suelos desarrollados sobre esquistos, parámetro que también ha resultado determinante de la calidad de estación en la zona de estudio.

CONCLUSIONES

En el presente estudio se ha obtenido que tanto los parámetros edáficos físicos, químicos, bioquímicos y los relativos al horizonte orgánico, resultan determinantes de la calidad de estación de las masas de *Pinus sylvestris* L en León y Palencia. El modelo seleccionado para predecir la calidad de estación incluye como parámetro edáfico físico la porosidad que auna información relativa a la textura y la estructura del suelo y por tanto, del régimen de humedad y aireación del mismo y la acidez de cambio como parámetro químico que informa acerca del grado de acidez del suelo y que a su vez determina la disponibilidad de nutrientes esenciales como el P. El espesor del horizonte orgánico y el C microbiano son, asimismo, parámetros relativos a la situación nutricional del suelo ya que ambos reflejan las entradas de nutrientes al suelo por medio del aporte de hojarasca y de los nutrientes que contiene la biomasa microbiana respectivamente. Por último, el modelo también incluye el Índice de Lang. El modelo seleccionado muestra un porcentaje de casos correctamente clasificados muy alto (77,14%), superior a lo que es normal en este tipo de estudios aunque sería interesante realizar una validación con datos independientes ya que la validación cruzada infravalora el error cometido por el modelo. También cabe destacar que ninguna de las parcelas de las calidades inferiores son asignadas a la clase más alta. Los parámetros edáficos, topográficos y climáticos que incluye este modelo son fáciles de obtener en campo o mediante análisis de laboratorio sencillos y se pueden llevar a cabo sin necesidad de un equipamiento específico.

BIBLIOGRAFÍA

- AFIF-KHOURI E, CÁMARA OBREGÓN MA, OLIVEIRA-PRENDES JA, GORGOSO-VARELA JJ, CANGA-LÍBANO E. 2010. Relationship among soil parameters, tree nutrition and site index of *Pinus radiata* D. Don in Asturias, NW Spain. *Forest Systems* 19 (1), 77-88.
- ALEF K. 1995. Soil respiration. En: *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. ALEF K, NANNIPIERI P. (Eds.) Academic Press. Londres, pp.: 214-222.
- ÁLVAREZ-ÁLVAREZ P, AFIF-KHOURI E, CÁMARA-OBREGÓN A, CASTEDO-DORADO F, BARRIO-ANTA M. 2011. Effects of foliar nutrients and environmental factors on site productivity in *Pinus pinaster* Ait. stands in Asturias (NW Spain). *Annals of Forest Science* 68, 497-509.
- ANDERSON TH, DOMSCH KH. 1993. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Short Communication, Soil Biology and Biochemistry* 25 (3), 393-395.
- BASCOMB CL. 1968. Distribution of pyrophosphate extractable iron and organic carbon in soils of various groups. *Journal of Soil Science* 19, 251-268.
- BERTSCH PM, BLOOM PR. 1996. Aluminum. In: SPARKS DL, PAGE AL, HELMKE PA, LOEPPERT RH, SOLTANPOUR PN, TABATABAI MA, JOHNSTON CT, SUMNER ME. (Eds.) 1996. *Methods of Soil Analysis. Part 3 – Chemical Methods*. Soil Science Society of America. pp: 517-550.

- BINKLEY D. 1993. Nutrición Forestal. Prácticas de manejo. Limusa, México D. F. 340 pp.
- BLAKEMORE LC, SEARLE PL, DALY BK. 1987. Methods for chemical analysis of soils. N.Z. Soil Bureau Sci. Rep. 80. Soil Bureau, Lower Hutt, New Zealand.
- BRAÑAS J, RODRÍGUEZ R, MERINO A. 2000. Nutrient stores in above-ground biomass, understory vegetation and soil of *Pinus radiata* plantation in NW Spain. In: International Symposium on managing forest soils for sustainable productivity. Vila Real, Portugal pp. 135-136.
- BRAVO F, MONTERO G. 2001. Site index estimation in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in the High Ebro Basin (northern Spain) using soil attributes. *Forestry* 74, 395-406.
- BRAVO F, LUCÀ M, MERCURIO R, SIDARI M, MUSCOLO A. 2011. Soil and forest productivity; a case study from Stone pine (*Pinus pinea* L.) stands in Calabria (southern Italy). *iForest* 4, 25-20 (URL: <http://www.sisef.it/forest/show.php?id=559>; Último acceso: 31/05/2012)
- BRAVO-OVIEDO A, GALLARDO-ANDRÉS C, DEL-RÍO M, MONTERO G. 2010. Regional changes of *Pinus pinaster* site index in Spain using a climate-based dominant height model. *Canadian Journal of Forest Research* 40, 2036-2048.
- BRAVO-OVIEDO A, MONTERO G. 2005. Site index in relation to edaphic variables in stone pine (*Pinus pinea* L.) stands in south west Spain. *Annals of Forest Science* 62, 61-72.
- BRAVO-OVIEDO A, MONTERO G. 2008. Descripción de los caracteres culturales de las principales especies forestales de España. En: SERRADA R, MONTERO G, REQUE JA. (Eds.) 2008. Compendio de Silvicultura Aplicada en España. INIA, Madrid. 1178 pp.
- BRAVO-OVIEDO A, GALLARDO-ANDRÉS C, DEL-RÍO M, MONTERO G. 2010. Regional changes of *Pinus pinaster* site index in Spain using a climate-based dominant height model. *Canadian Journal of Forest Research* 40, 2036-2048.
- BRAVO-OVIEDO A, ROIG S, BRAVO F, MONTERO G, DEL-RÍO M, 2011. Environmental variability and its relationship to site index in Mediterranean maritime pine. *Forest Systems* 20 (1), 50-64.
- BROOKES PC, POWLSON DS, JENKINSON DS. 1982. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 14, 169-175.
- BROWN JH. 2007. Growth and site index of White Pine in relation to soils and topography in the glaciated areas of Ohio. *Northern Journal of Applied Forestry* 24 (2), 98-103.
- CAPEL MOLINA JJ. 1982. La aridez en la Península Ibérica. Algunos índices bioclimáticos. En: Homenaje almeriense al botánico Rufino Sagredo. Instituto de Estudios Almerienses. Almería.
- CHEN HYH, KLINKA K, KABZEMS D. 1998. Site index, site quality, and foliar nutrients of trembling aspen: relationships and predictions. *Canadian Journal of Forest Research* 28, 1743-1755.
- CHEN HYH, KRESTOV PV, KLINKA K. 2002. Trembling aspen site index in relation to environmental measures of site quality at two spatial scales. *Canadian Journal of Forest Research* 32, 112-119.
- COBERTERA E. 1993. Edafología aplicada. Cátedra, Madrid. 326 pp.
- CORONA P, SCOTTI R, TARCHIANI N. 1998. Relationship between environmental factors and site index in Douglas-fir plantations in central Italy. *Forest Ecology and Management* 110, 195-207.
- DEL-RÍO M, LÓPEZ-SENEPLEDA E, MONTERO G. 2006. Manual de gestión para masas procedentes de repoblación de *Pinus pinaster* Ait., *Pinus sylvestris* L. y *Pinus nigra* Arn. en Castilla y León. Serie Técnica. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Castilla y León. 76 pp + anexos.
- DE MARTONNE E. 1926. Une nouvelle fonction climatologique: L'Indece d'aridite. *La Meteorologie* 2, 449-458.
- DGCN. 2002. El Tercer Inventario Forestal Nacional. MMA-DGCN, Madrid, España.
- DUNBAR A, NI DHUBHAIN A, BULFIN M. 2002. The productivity of Douglas-fir in Ireland. *Forestry* 75, 537-545.

- FISHER RF, BINKLEY D. 1999. Ecology and management of forest soils. Wiley. New York. 489 pp.
- FONTES L, TOMÉ M, THOMPSON F, YEOMANS A, SALES LUIS J, SAVILL P. 2003. Modelling the Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) site index from site factors in Portugal. *Forestry* 76, 491-507.
- GARCÍA C, GIL F, HERNÁNDEZ T, TRASAR C. (Eds.) 2003. Técnicas de Análisis de Parámetros Bioquímicos en Suelos: Medida de Actividades Enzimáticas y Biomasa Microbiana. Mundi-Prensa, Madrid. 371 pp.
- GARTZIA-BENGOETXEA N, GONZÁLEZ ARIAS A, MERINO A, MARTÍNEZ DE ARANO I. 2009. Soil organic matter in soil physical fractions in adjacent semi-natural and cultivated stands in temperate Atlantic forests. *Soil Biology and Biochemistry* 41, 1674-1683.
- GERDING V, SCHLATTER JE. 1995. Variables y factores del sitio de importancia para la productividad de *Pinus radiata* D. Don en Chile. *Bosque* 16 (2), 39-56.
- HAIR JF, ANDERSON E, TATHAM L, BLACK C. 1999. Análisis Multivariante. Prentice Hall. 829 pp.
- HARDING RB, GRIGAL DF, WHITE EH. 1985. Site quality evaluation for white spruce plantations using discriminant analysis. *Soil Science Society of America Journal* 49, 229-232.
- HENRI CJ. 2001. Soil-site productivity of *Gmelina arborea*, *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus grandis* forest plantations in western Venezuela. *Forest Ecology and Management* 144, 255-264.
- HERRERO C. 2010. Cuantificación de Carbono en Pinares (*Pinus nigra* Arn., *Pinus pinaster* Ait., *Pinus sylvestris* L.) y Rebollares (*Quercus pyrenaica* Willd.) Mediterráneos. Tesis Doctoral.
- JENKINSON DS, LADD JN. 1981. Microbial biomass in soils: measurement and turnover. En: PAUL E.A., LADD J.N. (Eds.) *Soil Biochemistry* Vol. 5. Marcel Dekker, New York, pp: 415-417.
- JOKELA EJ, WHITE EH, BERGLUND JV. 1988. Predicting Norway spruce growth from soil and topographic properties in New York. *Soil Science Society of America Journal* 52 (3), 809-815.
- KAYAHARA GJ, KLINKA K, MARSHALL PL. 1998. Testing site index-site-factor relationships for predicting *Pinus contorta* and *Picea engelmannii* x *P. glauca* productivity in central British Columbia, Canada. *Forest Ecology and Management* 110, 141-150.
- LANG R. 1915. Versuch einer exakten Klassifikation der Boden in klimatischer und geologischer Hinsicht. *International Mitteilungen Bodenkunde* 5, 312-346.
- LÓPEZ O. 1993. Efectos del uso agroforestal sobre distintas propiedades edáficas en suelos desarrollados sobre una superficie de raña al norte de Palencia. Tesis Doctoral.
- MAHÍA J, PÉREZ-VENTURA L, CABANEIRO A, DÍAZ-RAVIÑA M. 2006. Soil microbial biomass under pine forests in the north-western Spain: influence of stand age, site index and parent material. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 15 (2), 152-159.
- MAKKONEN K, HELMISAARI H. 1998. Seasonal and yearly variations of fine-root biomass and necromass in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand. *Forest Ecology and Management* 102, 283-290.
- MEHLICH A. 1953. Rapid determination of cation and anion exchange properties and pH of soils. *Journal of Association Agriculture Chemistry* 36, 445-447.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN. 1993. Métodos oficiales de análisis. Tomo III. Madrid.
- MOLINA E, BORNEMISZA E, SANCHO F, KASS D.L. 1991. Soil aluminum and iron fractions and their relationships with P-immobilization and other soil properties in andisols of Costa-Rica and Panama. *Communications in soil science and plant analysis* 22, 1459-1476.
- MURPHY J, RILEY JP. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 27, 31-36.

- NIGH GD. 2006. Impact of climate, moisture regime, and nutrient regime on the productivity of Douglas-fir in coastal British Columbia, Canada. *Climatic Change* 76, 321-337.
- NINYEROLA M, PONS X, ROURE J.M. 2005. Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica. ISBN 932860-8-7. Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra.
- ORTEGA A, MONTERO G. 1988. Evaluación de la calidad de las estaciones forestales. Revisión bibliográfica. *Ecología* 2, 155-184.
- OLSEN RS, COLE CV, WATANABE FS, DEAN LA. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circular 939.
- PACHECO C. 1991. Evaluating site quality of even-aged maritime pine stands in northern Portugal using direct and indirect methods. *Forest Ecology and Management* 41, 193-204.
- PORTA J, LÓPEZ-ACEBEDO M, ROQUERO DE LABURU C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ed. Mundi Prensa, Madrid. 849 pp.
- PRITCHETT WL. 1986. Suelos Forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento. Limusa, México D.F. 635 pp.
- ROMANYÀ J, VALLEJO VR. 2004. Productivity of *Pinus radiata* plantations in Spain in response to climate and soil. *Forest Ecology and Management* 195, 177-189.
- SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ F, RODRÍGUEZ-SOALLEIRO R, ESPAÑOL E, LÓPEZ C A, MERINO A. 2002. Influence of edaphic factors and tree nutritive status on the productivity of *Pinus radiata* D. Don plantations in northwestern Spain. *Forest Ecology and Management* 171, 181-189.
- SCHOLLENBERGER CJ, SIMON RH. 1945. Determination of exchange capacity and exchangeable bases in soils - ammonium acetate method. *Soil Science* 59, 13-24.
- SERRADA R, MONTERO G, REQUE JA. (Eds.), 2008. Compendio de Selvicultura Aplicada en España. INIA, Madrid. 1178 pp.
- SEYNAVE I, GÉGOUT JC, HERVÉ JC, DHÔTE JF, DRAPIER J, BRUNO E, DUMÉ G. 2005. *Picea abies* site index prediction by environmental factors and understorey vegetation: a two-scale approach based on survey databases. *Canadian Journal of Forest Research* 35, 1669–1678.
- SHARMA RP, BRUNNER A, EID T. 2012. Site index prediction from site and climate variables for Norway spruce and Scots pine in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*. DOI:10.1080/02827581.2012.685749
- SKOVSGAARD JP, VANCLAY JK. 2008. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry* 81 (1) , 13-31.
- STATGRAPHICS. 2009. STATGRAPHICS® Centurion XVI User Manual. StatPoint Technologies, Inc.
- STENDAHL J, SNÄLL S, OLSSON MT, HOLMGREN P. 2002. Influence of soil mineralogy and chemistry on site quality within geological regions in Sweden. *Forest Ecology and Management* 170, 75-88.
- SZWALUK KS, STRONG WL. 2002. Near-surface soil characteristics and understorey plants as predictors of *Pinus contorta* site index in Southwestern Alberta, Canada. *Forest Ecology and Management* 176, 13-24.
- THORNTON CW. 1949. A rational approach to the classification of climate. *Geographical Review* 38, 55–94.
- TURNER J, HOLMES GI. 1985. Site classification of *Pinus radiata* plantations in the Lithgow District, New South Wales, Australia. *Forest Ecology and Management* 12, 53-63.

- VANCE ED, BROOKES PC, JENKINSON DS. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry* 19, 703-707.
- VANCLAY JK. 1994. *Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forests*. CAB International, Wallingford, U.K.
- WALKLEY A, BLACK I A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37, 29-37.
- WANG GG, KLINKA K. 1996. Use of synoptic variables in predicting white spruce site index. *Forest Ecology and Management* 80, 95-105.
- ZAS R, SERRADA R. 2003 Foliar nutrient status and nutritional relationships of young *Pinus radiata* D. Don plantations in northwest Spain. *Forest Ecology Management*. 174: 167-176.