



UNIVERSITAT DE LLEIDA

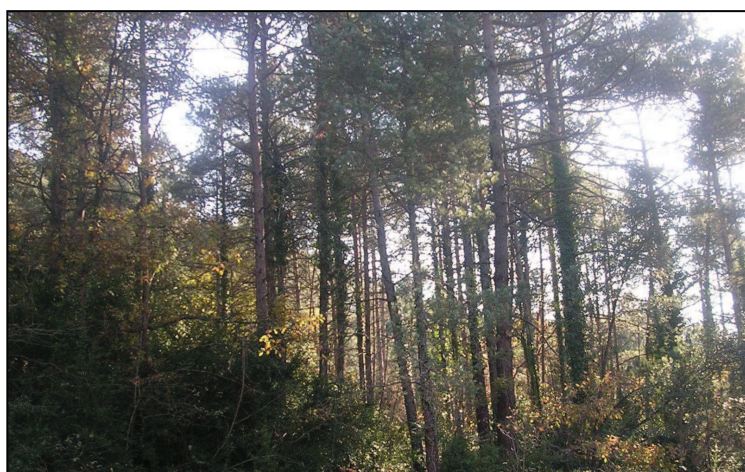


ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA AGRÀRIA

Departament de Producció Vegetal i Ciència Forestal

Projecte Final de Carrera

Models de creixement diametral i funcions alçada- diàmetre per a *Pinus sylvestris* L. al Parc Comarcal del Castell de Montesquiú (Osona)



Alumna: Laura Farré Masip

Tutor: Francisco Rodríguez Puerta

Co-tutor: Ricardo Blanco Ortiz

Agraïments

Al personal del Parc Comarcal del Castell de Montesquiu. En Jordi Jürgens, enginyer del parc, fou qui proposà la idea de realitzar una sèrie d'estudis sobre el pi roig al parc i ens facilità el Pla Tècnic de la finca. L'Eduard Botell, director del parc, i en Castany ens van ajudar en tot moment durant l'estada a Montesquiu, facilitant-nos un magnífic allotjament, material i documentació molt útil a l'hora de realitzar el treball de camp. El Guarda Forestal ens va acompanyar a localitzar els rodals i gràcies a la seva experiència i coneixement de la zona vam poder seleccionar les parcel·les adequades. Molt especialment vull donar les gràcies a l'Esteve i a l'Albert, per la seva disponibilitat, paciència i bon humor.

Al meu tutor, en Paco Rodríguez, per guiar-me i ajudar-me al llarg de l'elaboració del treball i per la seva paciència a l'hora de resoldre els meus dubtes. Al meu co-tutor, en Ricardo Blanco, pel seus consells en el tema de l'anàlisi estadística. També m'agradaria donar les gràcies al Jordi Romà per la seva ajuda en l'anàlisi dendromètrica i el tractament de les dades.

Als membres del tribunal per la seva disponibilitat i especialment a l'Àlvaro Aunós per donar-me la oportunitat de realitzar aquest projecte.

A l'Óscar i la Montse, companys d'aquesta aventura; i a totes les persones que han estat al meu costat al llarg de tot l'any.

ÍNDEX

1 INTRODUCCIÓ	7
1.1 DESCRIPCIÓ DE <i>Pinus sylvestris</i> L.	8
1.1.1 TAXONOMIA	8
1.1.2 ÀREA DE DISTRIBUCIÓ	9
1.1.3 ECOLOGIA	10
1.1.4 SILVICULTURA	10
1.2 DESCRIPCIÓ DE LA ZONA D'ESTUDI	11
1.2.1 SITUACIÓ GEOGRÀFICA I EXTENSIÓ	11
1.2.2 SITUACIÓ LEGAL I ADMINISTRATIVA	12
1.2.3 RELLEU I GEOLOGIA	13
1.2.4 CLIMA	13
1.2.5 VEGETACIÓ	15
1.2.6 GESTIÓ DE LA FINCA	16
1.3 LA MODELITZACIÓ EN L'ÀMBIT FORESTAL	17
1.3.1 CONCEPTES BÀSICS	17
1.3.2 CLASSIFICACIÓ DELS MODELS	17
1.3.3 MODELS DE PREDICCIÓ DE L'ALÇADA TOTAL DE L'ARBRE	19
1.3.4 MODELS DE CREIXEMENT EN DIÀMETRE	19
1.4 EL CREIXEMENT I ELS FENÒMENS DE COMPETÈNCIA	20
1.5 JUSTIFICACIÓ DE L'ESTUDI	22
2 OBJECTIUS	24
3 MATERIALS I MÈTODES	26
3.1 INVENTARI	27
3.1.1 PRIMERA FASE: SELECCIÓ DELS RODALS	27
3.1.2 SEGONA FASE: REPLANTEIG DE LES PARCEL·LES I INVENTARI DE DIÀMETRES	30
3.1.3 TERCERA FASE: EXTRACCIÓ DELS TESTIMONIS DE FUSTA I TALLADA	32

3.2 ANÀLISI DENDROMÈTRIC	33
3.2.1 ANÀLISI DELS TESTIMONIS DE FUSTA	34
3.2.2 ANÀLISI DE LES FOTOGRAFIES DE SECCIONS NORMALS	35
3.3 ANÀLISI ESTADÍSTICA DE FUNCIONS ALÇADA-DIÀMETRE	36
3.3.1 CÀLCUL I DESCRIPCIÓ DE LES VARIABLES	36
3.3.2 MODELS ANALITZATS	39
3.3.3 AJUST I VALIDACIÓ DELS MODELS	42
3.4 ANÀLISI ESTADÍSTICA DE MODELS DE CREIXEMENT EN DIÀMETRE	46
3.4.1 CÀLCUL I DESCRIPCIÓ DE LES VARIABLES	46
3.4.2 AJUST I VALIDACIÓ DELS MODELS	52
<u>4 RESULTATS I DISCUSSIÓ</u>	54
4.1 RESULTATS I DISCUSSIÓ DE FUNCIONS ALÇADA-DIÀMETRE	55
4.1.1 RESULTATS DE L'AJUST	55
4.1.2 RESULTATS DE LA VALIDACIÓ I SELECCIÓ DEL MODEL ÒPTIM	60
4.2 RESULTATS I DISCUSSIÓ DE MODELS DE CREIXEMENT EN DIÀMETRE	64
4.2.1 RESULTATS DE L'AJUST	64
4.2.2 RESULTATS DE LA VALIDACIÓ I SELECCIÓ DEL MODEL ÒPTIM	68
<u>5 CONCLUSIONS</u>	71
<u>6 BIBLIOGRAFIA</u>	73
<u>7 ANNEXES</u>	77
7.1 LOCALITZACIÓ DE LES PARCEL·LES	78
7.2 FITXES DE CAMP	79
7.2.1 FITXA DE SELECCIÓ DE PARCEL·LES	79
7.2.2 FITXA DE CARACTERITZACIÓ DASOMÈTRICA	80
7.2.3 FITXA DENDROMÈTRICA	81

7.3 GRÀFICS DE RESIDUS	82
7.3.1 AJUST DE FUNCIONS ALÇADA-DIÀMETRE	82
7.3.2 AJUST DE MODELS DE CREIXEMENT DIAMETRAL AMB VARIABLE DEPENDENT <i>CRM5</i>	85
7.3.3 AJUST DE MODELS DE CREIXEMENT DIAMETRAL AMB VARIABLE DEPENDENT <i>CSM5</i>	86
7.3.4 AJUST DE MODELS DE CREIXEMENT DIAMETRAL AMB VARIABLE DEPENDENT <i>Ln(CRM5)</i>	87
7.3.5 AJUST DE MODELS DE CREIXEMENT DIAMETRAL AMB VARIABLE DEPENDENT <i>Ln(CSM5)</i>	88

1. INTRODUCCIÓ

1.1 DESCRIPCIÓ DE *Pinus sylvestris* L.

1.1.1 TAXONOMIA

El *Pinus sylvestris* es conegut a Catalunya amb diferents noms comuns, així segons la zona es pot anomenar pi roig, pi rojal, rajolet, pi bord, etc. El seu nom prové de la tonalitat rogenca o ataronjada que presenta a la part superior del tronc i base de les branques. Els noms comuns en altres llengües, així com els noms comercials, apareixen a la **Taula 1.1**.

Taula 1.1: Noms comuns de *Pinus sylvestris* en altres idiomes i noms comercials (CASTROVIEJO *et al.*, 1986; RUIZ DE LA TORRE, 1984).

Castellà	Pino royano, pino rojal, pino álbar, pino silvestre, pino común, pino serrano
Euskera	Pinu gorria, ler gorria
Gallec	Pino bravo
Portuguès	Pinheiro-silvestre, pinheiro-da-casquinha, pinheiro-de-riga
Anglès	Wild pine, Scotch pine
Francès	Pin commun, pin silvestre
Alemanys	Weiss Föhre, Wald Kiefer
Noms comercials	Pi d'Escòcia, del Bàltic, de Valsaín... segons el seu origen.

Es troben fòssils de pi roig a partir del Pliocè (13 milions d'anys enrera), si bé es creu que l'espècie podria ser més antiga, ja que presenta trets arcaics com ara el tipus de cotilèdons, la mida petita de la pinya i el gra de pol·len i la posició dels canals resinífers de l'acícula (RUIZ DE LA TORRE, 1984). La seva antiguitat hauria donat lloc a una gran variació taxonòmica i genètica.

Actualment hi han diferenciades unes 150 unitats taxonòmiques classificades en cinc grups geogràfics. Les dues varietats presents a Catalunya són la **var. *catalaunica* Gaussen** i la **var. *pyrenaica* Svob.** Totes dues pertanyen al grup IV que es caracteritza per tenir la capçada cònica, el tronc recte, l'angle de les branques recte i l'escorça fina amb fissures irregulars a la part basal (CATALAN *et al.*, 1991). Aquestes trets, però, varien segons les condicions locals en què s'ha desenvolupat l'arbre i altres factors com ara l'edat. Les dues

varietats es diferencien pel color del fullatge: glaucescent en la var. *catalaunica* Gaussen i de color verd fosc en la var. *pyrenaica* Svob. (DE BOLÓS i VIGO, 1984).

1.1.2 ÀREA DE DISTRIBUCIÓ

El pi roig s'estén àmpliament per Europa i Àsia, essent l'espècie de pi amb una major àrea de distribució natural (veure **Fig. 1.1**). A la Península Ibèrica, límit meridional i occidental de l'espècie, es distribueix per les principals serralades donant lloc a una àrea fragmentada amb nombroses masses marginals, residus d'una major presència durant el passat (CATALAN *et al.*, 1991). A la península, ocupa actualment una extensió aproximada de 1.280.000 ha. D'aquestes, unes 600.000 ha corresponen a masses naturals i la resta a repoblacions efectuades principalment durant la segona meitat del segle XX.

A Catalunya, l'espècie ocupa una extensió d'un 220.000 ha (CREAF, 2000). La var. *catalaunica* Gaussen s'estén pels Pirineus i la Catalunya central fins a les muntanyes Catalanídiques (Serra pre-litoral, Serra litoral i part alta de les muntanyes de Prades i dels Ports de Besseit). Mentre que la var. *pyrenaica* Svob. es troba als Pirineus centrals (Ribagorça fins al Berguedà), però amb una menor presència que l'anterior (DE BOLÓS i VIGO, 1984).

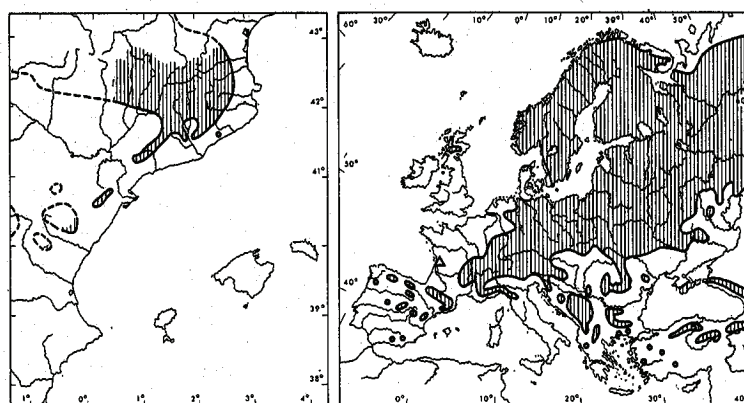


Fig. 1.1: Distribució de *Pinus sylvestris* L. als Països Catalans i Europa (DE BOLÓS i VIGO, 1984).

1.1.3 ECOLOGIA

El *Pinus sylvestris* és una espècie amb una gran amplitud ecològica, fet que s'ha traduït en una gran extensió de la seva àrea natural, varietat d'hàbitats i diversitat morfològica de l'espècie.

Pel que fa al substrat no és exigent i tolera tant els sòls calcaris com els silícics. Pot viure fins i tot en terrenys pobres i superficials, gràcies al potent desenvolupament de les seves arrels secundàries que li proporcionen un bon ancoratge. Es tracta, doncs, d'una espècie que juga un paper molt important com a protectora del sòl contra l'erosió.

El seu temperament és intolerant, ja que necessita llum per al seu desenvolupament, encara que en les regions més continentals de la península es pot considerar de mitja llum. Ocupa una ampla varietat d'exposicions i altituds. Als Pirineus es troba gairebé sempre a les solanes, a excepció de les cotes més baixes on busca exposicions d'obaga. A Catalunya la trobem des dels 300 m fins als 2.000 m, essent les cotes de 1.200 m les zones amb més productivitat.

Pel que fa la règim de precipitacions, el seu comportament està influït per la continentalitat i la constitució genètica de les poblacions. Als Pirineus requereix una precipitació mitjana anual superior a 600 mm, dels quals uns 200 mm han de donar-se a l'estiu.

1.1.4 SILVICULTURA

A Catalunya el tractament clàssic de regeneració dels boscos de pi roig és el de tallades d'aclarida successiva. Segons diferents estudis portats a terme a Espanya (GONZÁLEZ VÁZQUEZ, 1945; ROJO i MONTERO, 1996), es tracta del mètode de regeneració que millor s'adapta a l'espècie, tenint en compte els factors que afecten a la seva regeneració natural. La modalitat més aplicada és l'aclarida successiva uniforme, degut a la seva major senzillesa a l'hora d'organitzar els treballs en l'espai i el temps i al menor cost econòmic. És el tractament més lògic per a les masses amb un objectiu principal productor o productor-protector amb poques restriccions. En canvi, en rodals amb un alt valor protector, paisatgístic o de conservació de la biodiversitat, l'aclarida successiva per bosquets o per faixes està justificada encara que suposi una gestió més curosa i costosa.

Els torns són generalment entre 100 i 125 anys amb períodes de rotació de 20-25 anys i s'obtenen unes produccions entre 1 i 4 m³/ha/any (ALEMANY, 1994). Pel que fa als treballs culturals, es necessari realitzar estassades per eliminar els matolls que proliferen sobretot en els boscos massa clars. Les aclarides depenen molt de l'espessor, generalment es fa una reducció de peus als 40 anys que es repeteix als 60 i 80 anys. S'eliminen sempre els arbres dominats, els malalts i els mal conformats.

Algunes explotacions de pi roig a Catalunya, com ara la d'Arques, les Montades de Surenyes i Carbonell, situades al Ripollès i amb altituds compreses entre els 800 i 1.000 m, es tracten amb tallades de selecció donant lloc a una massa semiregular (CENTRE DE LA PROPIETAT FORESTAL, 1995). Aquest tractament normalment no afavoreix una bona regeneració natural, ja que el pi roig necessita llum per al seu desenvolupament. A més té el risc de portar a una degradació de la massa si no es realitza amb cura, és a dir, si no es fa una bona selecció d'arbres que podria degenerar cap a la pràctica de tallades d'escollida ("cortas de huroneo", en castellà). Si s'opta per aquest tipus de tractament, es convenient concentrar les tallades en petites clapes per tal de possibilitar la regeneració. El diàmetre de tallada és normalment de 20-30 cm i el període és molt irregular, de 7 a 15 anys.

1.2 DESCRIPCIÓ DE LA ZONA D'ESTUDI

1.2.1 SITUACIÓ GEOGRÀFICA I EXTENSIÓ

El Parc Comarcal del Castell de Montesquiú, amb una superfície total de 564 ha, es troba situat a l'extrem nord de la comarca d'Osona (província de Barcelona). La major part de la seva extensió pertany al terme municipal de Montesquiú, la resta ocupa sòls dels municipis de Sora, Sta. Maria de Besora i Sant Quirze de Besora. Aquests municipis conjuntament amb Vidrà constitueixen la subcomarca del Bisaura (veure **Fig. 1.2**).

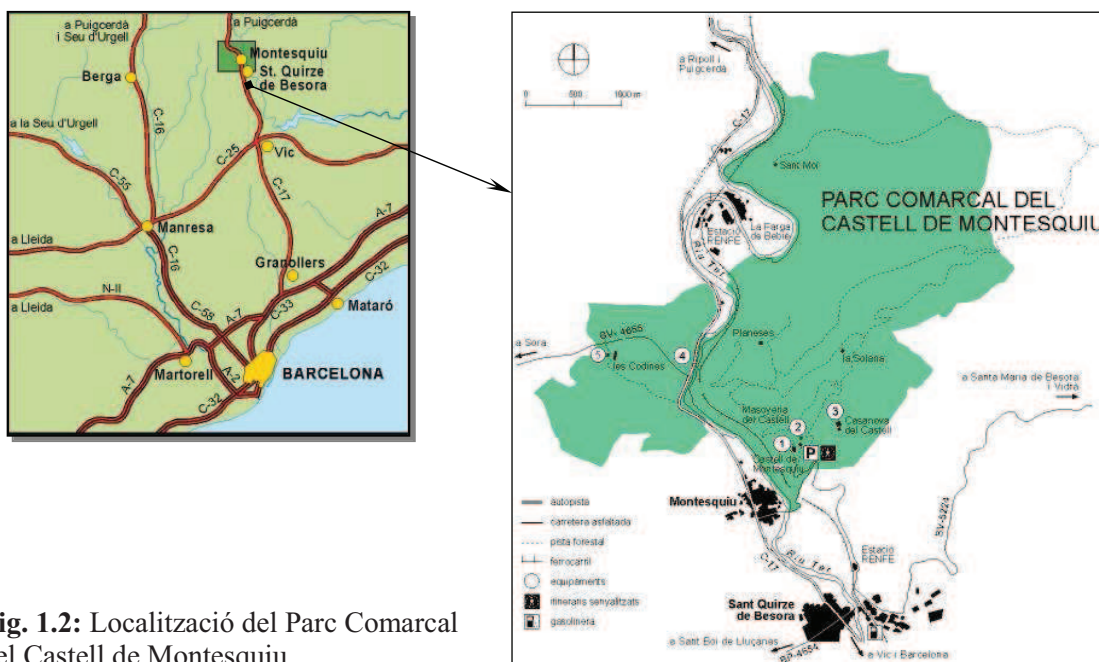


Fig. 1.2: Localització del Parc Comarcal del Castell de Montesquiu.

1.2.2 SITUACIÓ LEGAL I ADMINISTRATIVA

Les finques que conformen el Parc són la finca del Castell, La Solana, Les Planeses i Les Codines. La totalitat de la seva superfície és de titularitat pública, propietat de la Diputació de Barcelona la qual, a través del Servei de Parcs Naturals, és l'entitat promotora i gestora del parc.

El Parc es troba sota les següents figures de planificació:

- **Pla Especial d'Ordenació** del Parc Comarcal del Castell de Montesquiu, aprovat el 30 de juliol de 1986 (D.O.G. 20.10.86 núm. 755) i modificat el 2 d'abril de 1998 (D.O.G. 02.07.98 núm. 2672).
- **Pla d'Espais d'Interès Natural** de la Generalitat de Catalunya pel Decret 328/92 de 14 de setembre (D.O.G. 02.07.98 núm. 2672).
- **Pla Tècnic de Gestió i Millora Forestal** aprovat l'any 2000 per la Generalitat de Catalunya.

1.2.3 RELLEU I GEOLOGIA

El Parc, a cavall entre l'Osona i el Ripollès, es troba, parlant en termes de geografia física, al sector del Subpirineu, el qual es diferencia del Prepirineu per les seves elevacions més baixes i terreny més suau.

Amb altituds que varien entre 570 i 850 m, el relleu ha estat modelat per les rieres que vessen les seves aigües al Ter, el qual divideix el Parc en dues parts desiguals. Una zona més gran, a la riba esquerra, ocupada per les conques de les rieres de Vallfogona, la de les Dous i la de la Solana. Aquestes rieres solquen el terreny formant vessants força pendents, la major part orientades cap a l'oest. L'altra zona, a la riba dreta, més petita i amb un relleu més suau, és on es troba la conca de la riera de Sora.

Els materials que conformen la roca mare en aquesta zona són margues i gresos amb presència d'alguns estrats calcaris interposats. Pel que fa a l'estat erosiu, no s'observen fenòmens evidents d'erosió (JÜRGENS, 2000).

1.2.4 CLIMA

Segons la caracterització fitoclimàtica d'Allué (1990), el clima és centroeuropeu o atlàntic d'hiverns freds i equival al clima mediterrani d'alta muntanya (submediterrani) de Miller.

La zona es caracteritza per tenir els hiverns freds i els estius moderats, amb unes temperatures mitges anuals que oscil·len entre els 9 i 11°C (veure **Fig.1.3**).

La precipitació es troba al voltant dels 750 mm anuals, tot i que pot variar bastant d'un any a l'altre (JÜRGENS, 2000). Cal destacar l'absència d'un període àrid, ja que els mesos de maig fins al setembre acostumen ser força plujosos. El vent, que a l'estiu sol ser de llevant, arriba carregat d'aire humit procedent del Mediterrani i es condensa al ascendir per les vessants. L'abundància d'aquestes pluges orogèniques determina el règim de precipitacions que, d'acord amb la latitud geogràfica de la zona, hauria de presentar un mínim a l'estiu (veure **Fig. 1.4**).

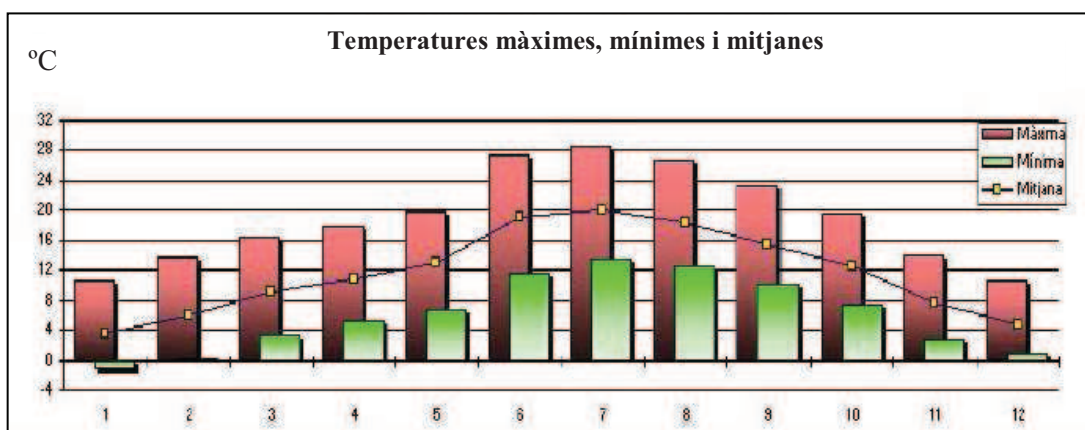


Fig. 1.3: Resum anual de temperatures del 2002. Estació del Castell de Montesquiu¹. (Font: DIPUTACIÓ DE BARCELONA).

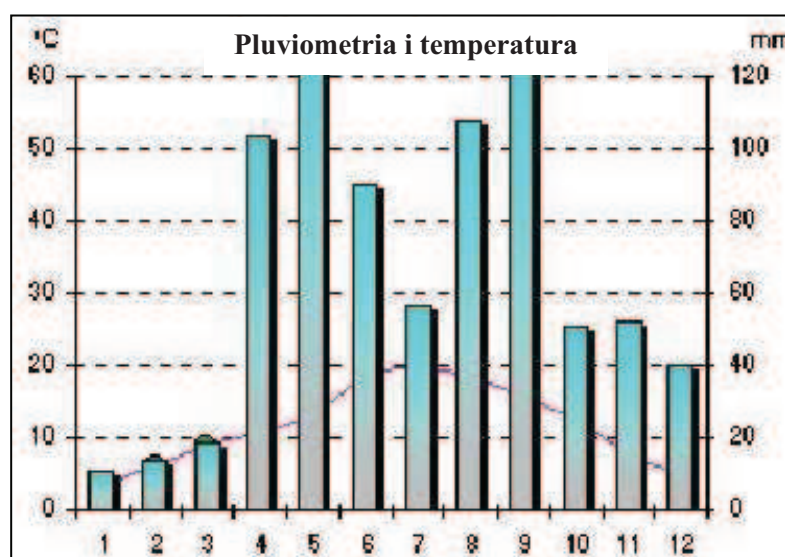


Fig. 1.4: Diagrama ombrotèrmic corresponent a l'any 2002. Estació del Castell de Montesquiu¹. (Font: DIPUTACIÓ DE BARCELONA).

¹ Coordenades UTM de l'estació automàtica del Castell de Montesquiu:
X =435181,92; Y=4663016,72; Z= 683m.

1.2.5 VEGETACIÓ

El Parc ofereix un paisatge eminentment forestal. Presenta un 92,4% de superfície forestal i d'aquesta un 89,4% és arbrada, front a un 61% i 42% respectivament a nivell de Catalunya (CREAF, 2000). La **Taula 1.2** mostra la classificació de la superfície del parc segons el tipus de vegetació.

Taula 1.2: Classificació de la superfície del Parc segons el tipus de vegetació (JÜRGENS, 2000).

Tipus de vegetació	Superfície real (ha)	Superfície real (%)
Superfície poblada amb espècies arbòries	504,28	89,4
Superfície poblada amb espècies no arbòries	16,86	3
Superfície total forestal	521,14	92,4
Superfície no forestal (conreus, edificis, etc)	42,86	7,6
Superfície total	564,00	100

La vegetació es representativa de l'estatge muntanyenc de la Catalunya submediterrània. Per les condicions climàtiques descrites més amunt, amb una pluviometria anual superior als 600 mm, es troba en el domini del roure martinenc (*Quercus humilis*). Encara que aquest es substituït pel pi roig principalment a les obagues, on s'instal·la formant boscos mixtos juntament amb el roure o boscos de pi roig, segons la seva abundància.

El sotabosc és similar tant si domina el roure com si ho fa el pi roig. En les zones on la humitat no és excessiva apareixen com a espècies acompanyants algunes aceràcies com l'auró blanc (*Acer campestre*), l'auró negre (*Acer monspessulanum*) i la blada (*Acer opalus*). També es troben algunes rosàcies com la pomera (*Sorbus malus*), la moixera de pastor (*Sorbus torminalis*), la moixera (*Sorbus aria*) i el server (*Sorbus domestica*). La baixa densitat de l'estrat arbori en moltes zones, ha permès la proliferació d'esbarzers (*Robus sp.*) i de boix (*Buxus sempervirens*) que en molts casos dominen el sotabosc.

Seguint els cursos de torrents i rieres, s'instal·la la vegetació de ribera que presenta una gran varietat d'espècies. S'hi poden trobar el tell de fulla gran (*Tilia platyphyllos*), el tell de fulla petita (*Tilia cordata*), l'om (*Ulmus minor*), el freixe de fulla gran (*Fraxinus excelsior*), el bedoll (*Betula pendula*), el vern (*Alnus glutinosa*) i el salze (*Salix alba*).

En les obagues més fresques apareix la fageda amb el faig (*Fagus sylvatica*) com espècie dominant, acompanyada pel roure de fulla gran (*Quercus petraea*), el cirerer (*Prunus avium*), l'om de muntanya (*Ulmus glabra*), el trèmol (*Populus tremula*) i el teix (*Taxus baccata*).

1.2.6 GESTIÓ DE LA FINCA

Els bosc ha estat varies dècades sense aprofitaments, 30 o 40 anys segons el Guarda Forestal del Parc. La massa, constituïda principalment per espècies intolerants (pi roig) o poc tolerants (roure martinenc) ha adoptat en la major part dels casos una estructura regular. En moltes zones la densitat és insuficient, la qual cosa ha permès un desenvolupament important del sotabosc.

El pi roig, que en condicions naturals tindria el caràcter d'acompanyant a la finca, ha estat afavorit de manera voluntària. El major valor econòmic de la fusta de pi i l'aprofitament del roure per a llenya en el passat, expliquen que actualment el pi roig domini en alguns indrets (JÜRGENS, 2000).

Actualment, la gestió del bosc es realitza sota les directrius del PTGMF, on es planifiquen les actuacions a realitzar entre el 2001 i el 2010, anys de la seva vigència. Aquest té com objectiu garantir la sostenibilitat de l'ús múltiple del bosc, gestionant-lo de la manera més natural possible.

Els tractaments de millora recomanats en el PTGMF són les aclarides de plançonada, així com aclarides selectives a l'edat de perxada i fustal. Aquests tractaments permeten regular la competència intraespecífica i afavorir els millors peus. Pel que fa al tipus de tallada de regeneració, es recomana l'aclarida successiva per bosquets, donada la presència d'espècies amb diferent grau de tolerància. Si la regeneració s'aconsegueix en menys de 20 anys s'obtindrà una massa regular. En alguns casos són convenients les estassades per facilitar els treballs silvícoles, que s'aplicaran de manera puntual al voltant dels arbres a tallar i únicament quan es realitzin les tallades de regeneració s'esbrossarà arreu.

Des del 2001 fins a l'actualitat, s'han realitzat tallades selectives en les unitats d'actuació de primera prioritat, tal com preveu el Pla.

1.3 LA MODELITZACIÓ EN L'ÀMBIT FORESTAL

1.3.1 CONCEPTES BÀSICS

Un model és una abstracció simplificada de la realitat utilitzada en la presa de decisions. La modelització és la metodologia emprada en la construcció del model i consisteix en reduir una realitat complexa a un sistema estructurat d'elements i de relacions, creat en funció d'un objectiu específic (STERBA, 2001 a ROMÀ, 2002). El resultat de la modelització ha de ser el més simple i manejable que expressi la realitat. Per altra banda, si s'accepta el principi de parsimònia, el millor model serà el sistema més senzill que permeti resoldre l'objectiu plantejat, i no el més pròxim a la realitat.

La modelització constitueix una eina molt útil per als gestors i propietaris forestals en la presa de decisions. Una de les aplicacions dels models és el desenvolupament de normes silvícoles o models de gestió, que s'utilitzen per simular la reacció de la massa davant diferents tractaments silvícoles per escollir el més adequat. Els models de gestió poden ser (ROMÀ, 2002): **models de creixement** referents al creixement en diàmetre, alçada o àrea basal dels arbres; o **models de producció**, terme usat principalment per al creixement en volum, un exemple són les taules de producció.

1.3.2 CLASSIFICACIÓ DELS MODELS

Els models es poden classificar en funció de diferents aspectes (RODRÍGUEZ, 2005; ROMÀ, 2002):

➤ Segons les dades de partida: models matemàtics, models estadístics i models científics. Els models matemàtics es desenvolupen a partir d'una base teòrica. Els models estadístics, en canvi, es construeixen a partir de dades reals mitjançant diferents tècniques estadístiques. En un terme mig es troben els models científics, que combinen fets obtinguts a partir de la bibliografia mitjançant sistemes d'anàlisi.

➤ Segons el tipus de predicció: models determinístics i models estocàstics.

Els models determinístics són aquells que associen a un *input* un únic *output*. Una mateixa combinació de valors de les variables independents equival sempre al mateix valor de les variables dependents. Els models estocàstics associen funcions de distribució com a

outputs enlloc de valors concrets. Així, d'una mateixa combinació de valors de variables independents en pot resultar un nombre infinit de valors per les variables dependents.

➤ Segons el tipus de variable resposta: models quantitativs i models qualitativs.

Els models quantitativs són aquells que tenen com a variable resposta una variable numèrica. En canvi, els models qualitativs empren com a variable resposta una variable qualitativa o relacions lògiques.

➤ Segons si es té en compte l'efecte del temps: models estàtics i models dinàmics.

Els models estàtics es desenvolupen a partir de dades que no reflecteixen directament el pas del temps. Un exemple serien les dades obtingudes de parcel·les temporals, exceptuant l'anàlisi de troncals. Els models dinàmics treballen amb sèries de temps real obtingudes, per exemple, a partir de parcel·les permanents.

➤ Segons l'objectiu i el nivell de precisió: models funcionals i models empírics.

Els models funcionals o explicatius intenten explicar el creixement mitjançant variables ecofisiològiques, és a dir, a través de coneixements sobre el funcionament i la fisiologia dels arbres. Un exemple d'aquests serien els models arquitecturals que estudien el patró que segueixen el creixement i la ramificació dels vegetals. Els models empírics o dendromètrics expliquen el creixement a partir de dades com les dimensions de l'arbre i de la massa obtingudes a partir d'un inventari o parcel·les permanents, sense tenir en compte els processos que influeixen en el creixement.

➤ Segons l'escala de treball: models a escala regional, models de massa i models d'arbre individual.

Els models a escala regional estudien característiques globals amb la finalitat d'obtenir informació sobre grans superfícies. S'usen en la planificació d'estratègies de política forestal i ordenació territorial. L'Inventari Forestal Nacional treballa a aquesta escala. Els models de massa treballen amb paràmetres observats a nivell de bosc referits a l'hectàrea. Les taules de producció en serien un exemple. Finalment, els models d'arbre individual tenen en compte el creixement i el desenvolupament de l'arbre i són molt més precisos que els anteriors. Aquests es poden dividir a la vegada en **models dependents de la distància** que tenen en compte la localització dels arbres dins de la massa per a quantificar la competència; i els **models independents de la distància** que no incorporen aquests tipus de paràmetres.

Els models desenvolupats en el present treball, tant els de predicció de l'alçada total com els de creixement diametral són, segons la classificació anterior: estadístics, determinístics, quantitatius, estàtics, empírics o dendromètrics i a escala d'arbre individual independents de la distància.

1.3.3 MODELS DE PREDICCIÓ DE L'ALÇADA TOTAL DE L'ARBRE

L'alçada total de l'arbre i el diàmetre normal són les variables més mesurades en un inventari forestal. Però a diferència del diàmetre, l'alçada és una variable menys habitual, ja que és més difícil i costosa de mesurar, i sovint proporciona valors inexactes (GADOW, 2001 a LÓPEZ *et al.*, 2003). Per aquest motiu moltes vegades no es mesura directament, sinó que s'estima a partir de relacions alçada-diàmetre ja establertes.

Aquestes relacions són de tipus local quan estan ajustades per a cada rodal. En la formulació de les **funcions d'alçada-diàmetre locals** apareixen dues variables: l'alçada total com a variable resposta i el diàmetre normal com a variable explicativa. Una alternativa a aquesta metodologia és l'ajust d'una **distribució bivariant d'alçades i diàmetres** que estimi directament les freqüències per a cada combinació de classe diamètrica i d'alçada (CASTEDO, 2003 a RODRÍGUEZ, 2005).

Aquest tipus de funcions presenten l'inconvenient que no s'adapten bé a totes les possibles situacions que es poden donar en una massa regular, ja que l'alçada no només depèn del diàmetre, també varia amb l'edat, la qualitat d'estació i la competència. Per tant, en masses regulars o coetànies amb grans variacions d'edat i/o qualitat d'estació es millor utilitzar les **funcions d'alçada-diàmetre generalitzada**, que incorporen variables de la massa en la seva formulació (LÓPEZ *et al.*, 2003).

1.3.4 MODELS DE CREIXEMENT EN DIÀMETRE

Es tracta de models on la variable resposta és el creixement diametral, que es pot expressar en valors de creixement radial mig o creixement en secció mig per a un determinat període de temps. Les variables explicatives que apareixen en l'estructura dels models fan referència als diferents factors que influeixen en el creixement dels anells. Segons COOK (1987) aquests factors són l'edat, la climatologia, factors interns al bosc (com la

competència i la qualitat d'estació) i factors externs (com les aclarides o les plagues). A aquests factors, WYKOFF *et al.*, 1982 (a ROMÀ, 2002) afegeixen la mida de l'arbre.

Una de les aplicacions d'aquests models és el desenvolupament de normes silvícoles o models de gestió. En aquest cas el model s'utilitza com un **simulador de creixement** per avaluar la reacció de la massa davant diferents tractaments silvícoles, de manera que permet seleccionar el tractament òptim. Si el model es vol utilitzar per aquesta finalitat, s'han de tenir en compte les aclarides. Aquestes apareixen com a variable explicativa en el model en termes de nombre de peus extrets per ha, pes de l'aclarida en àrea basal extreta o en percentatge d'àrea basal extreta.

L'altre ús principal dels models és la **predicció del creixement** en funció de determinats factors com el medi, el potencial de l'estació i el potencial genètic, bàsicament amb finalitats econòmiques (ROMÀ, 2002).

1.4 EL CREIXEMENT I ELS FENÒMENS DE COMPETÈNCIA

El creixement en les plantes es produeix a partir d'uns teixits anomenats meristemes, les cèl·lules dels quals tenen capacitat de divisió i diferenciació. Els arbres presenten dos tipus de creixement: el primari i el secundari. El creixement primari o en alçada és conseqüència de l'activitat dels meristemes primaris o apicals, que com el seu nom indica estan localitzats als àpex, és a dir, als extrems de les branques i les arrels. Els meristemes apicals es formen durant el desenvolupament embrionari, mentre s'origina la llavor. El creixement secundari o en gruix es produeix gràcies al meristema secundari o càmrium vascular, que no es diferencia fins després de la germinació. No totes les plantes superiors presenten creixement secundari: en les monocotiledònies l'augment del gruix del tronc es produeix gràcies a la base de les fulles que persisteix damunt la tija quan aquestes es marceixen i cauen.

L'estacionalitat climàtica condiciona l'activitat del càmrium vascular, que s'atura durant l'hivern i es reprèn a la primavera quan comença el període vegetatiu. Als primers mesos del període vegetatiu, el càmrium va formant una gran quantitat de cèl·lules de paret prima i amb un lumen ample, que constitueixen la fusta de primavera. A mesura que transcorre el

període vegetatiu, les parets de les cèl·lules formades són més amples i amb un lumen més estret, originant la fusta de tardor. Això provoca una diferenciació en les propietats de la fusta: a la primavera és més clara i menys densa, mentre que a la tardor és més fosca i més densa. Gràcies a l'aspecte distint d'aquestes dues menes de fusta, es pot diferenciar clarament el creixement anual, en forma de cercles concèntrics, definits pel contacte de la fusta de tardor d'un any amb la de primavera de l'any següent. D'aquesta manera es pot conèixer l'edat d'un arbre determinat, segons el nombre d'anells de creixement.

D'altra banda, el creixement en gruix és més sensible que el creixement en altura davant de condicions restrictives del medi. De manera que l'amplada dels anells ens aporta informació sobre les condicions de creixement en anys determinats. Aquesta informació pot ser relativa al clima, plagues, incendis, intervencions silvícoles, competència i molts altres aspectes influents en el creixement dels arbres.

L'efecte de la competència interespecífica en el creixement dels arbres és un concepte difícil de quantificar. Els arbres no solament competeixen per la manca d'aigua, llum o nutrients; a vegades és una qüestió d'obstrucció física produïda per la proximitat dels arbres veïns que impedeixen l'expansió de la capçada (LEE i GADOW, 1997). La disminució dels recursos disponibles es tradueix en una reducció del creixement, primer en diàmetre i després en alçada, que pot portar fins i tot a la mort de l'arbre a llarg termini.

La competència que exerceixen els arbres quan interfereixen en el creixement d'un arbre determinat es pot estimar quantitativament a partir dels índex de competència. Aquests índexs poden estar referits a **nivell de rodal** o a **nivell d'arbre individual**. Els primers són coneguts com a "Índex de densitat" i suposen una competència uniforme en tots els arbres del mateix rodal (BRAVO *et al.*, 1997). En canvi, els índexs de competència a nivell d'arbre suposen una competència diferent per cada arbre de la massa. Els índexs de competència també es poden classificar en funció del tractament que fan de la distribució espacial dels arbres en **índexs independents de la distància** i **índexs dependents de la distància**. Els primers no tenen en compte la distribució espacial dels arbres i avaluen la competència en funció de l'espessor mig suposant que l'espaiament és equivalent a tota la massa. Els segons tenen en compte la distribució espacial dels arbres. Suposen que les variables de massa no són suficients per explicar la competència dels arbres veïns (ÁLVAREZ, 1998).

El desenvolupament dels índex de competència està molt relacionat amb el dels models de creixement, ja que la consideració de certs paràmetres com la distància entre els arbres o la distribució espacial millora la predicció del creixement. En aquest sentit, són nombrosos els treballs que relacionen la competència amb els models de creixement, cal destacar els realitzats per BIGING i DOBBERTIN en boscos mixtes de coníferes. Aquests autors comparen l'eficàcia de diversos índexs dependents de la distància (BIGING i DOBBERTIN, 1992) i independents de la distància (BIGING i DOBBERTIN, 1995).

1.5 JUSTIFICACIÓ DE L'ESTUDI

Aquest treball s'ha realitzat paral·lelament a dos treballs més, tots ells amb l'objectiu d'estudiar i caracteritzar diferents aspectes de les masses regulars del pi roig al Parc Comarcal del Castell de Montesquiú. Aquests estudis han estat proposats per la Diputació de Barcelona, titular del Parc, i dirigits i coordinats pel "Departament de Producció Vegetal i Ciència Forestal" de l' "Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària de Lleida".

Els treballs se centren en l'estudi del perfil del tronc, l'elaboració de corbes de qualitat i la modelització del creixement diametral del pi roig en la zona anteriorment esmentada. El present treball se centra en aquest últim aspecte i es complementa amb l'estudi de funcions alçada-diàmetre. Els tres Projectes Finals de Carrera es volen complementar i ser en conjunt una eina d'ajuda a la gestió del Parc.

L'espècie principal del Parc és el pi roig i actualment no existeixen models de creixement de l'espècie per aquesta zona. Existeixen taules de producció de silvicultura variable per al sistema pirinenc publicades per l'INIA (GARCIA i TELLA, 1986). Aquestes es poden utilitzar per estimar la producció d'una determinada massa, però no són models tan precisos com els obtinguts en el present treball, ja que aquests han estat desenvolupats per a la massa en concret i a escala d'arbre individual.

En canvi, trobem models de creixement del pi roig per a altres zones, com el desenvolupat per l'INIA per al Sistema Central (DEL RÍO i MONTERO, 2001). Per a altres espècies també existeixen models de creixement, per exemple per la pinassa (ROMÀ, 2002), el pi radiata (RODRÍGUEZ, 1999) i el pollancre (RODRÍGUEZ, 2005).

2. OBJECTIUS

Els objectius principals del present estudi són:

- Obtenir la funció alçada-diàmetre generalitzada més adequada per estimar l'alçada total individual.
- Construir un model de creixement diametral.

Aquests objectius estan referits a les masses regulars de *Pinus sylvestris* L. al Parc Comarcal del Castell de Montesquiú.

A partir d'aquests, es deriven els següents objectius secundaris:

- Avaluar l'efecte de les variables silvícoles significativament influents en l'alçada i en el creixement en diàmetre.
- Avaluar els diferents tipus d'índex de competència utilitzats en la parametrització del model de creixement.

3. MATERIALS I MÈTODES

3.1 INVENTARI

Abans de descriure la metodologia emprada en l'inventari, cal comentar que aquest estudi s'ha realitzat paral·lelament a dos estudis més, tots ells centrats en caracteritzar diferents aspectes de les masses de pi roig al Parc Comarcal del Castell de Montesquiú. El treball de camp s'ha portat a terme conjuntament, de manera que les dades recollides en l'inventari s'han utilitzat per obtenir els resultats dels tres projectes finals de carrera. Per aquesta raó algunes de les variables recollides a camp no són utilitzades en l'anàlisi estadística del present estudi.

A continuació es descriu el protocol seguit per realitzar l'inventari. Les fitxes de camp utilitzades es poden consultar a l'**Annex 7.2**.

3.1.1 PRIMERA FASE: SELECCIÓ DELS RODALS

El mostreig realitzat en l'inventari va ser dirigit amb l'objectiu de recollir la màxima variabilitat possible pel que fa a qualitat d'estació. Aquest tipus de mostreig permet obtenir un model amb un rang d'aplicació més ampli (VANCLAY, 1994 a RODRÍGUEZ, 2005). Aquest va ser el factor més important que va condicionar la localització dels rodals i, per tant, de les parcel·les. Un altre aspecte considerat a l'hora de localitzar els rodals va ser la seva accessibilitat, per a permetre el transport de les serres mecàniques fins a les parcel·les. Els rodals seleccionats per instal·lar les parcel·les, a més de ser fàcilment accessibles i heterogenis en relació a la qualitat, havien de complir els següents criteris proposats per BRAVO i LIZARRALDE (2004):

1. Han de ser masses regulars on l'espècie dominant sigui el *Pinus sylvestris*.
2. El pi roig ha de representar com a mínim el 70% de l'àrea basal total.
3. L'edat de la massa ha de ser superior als 20 anys.
4. El rodal ha de tenir una superfície suficient per tal que es pugui instal·lar una parcel·la.
5. El rodal no ha d'haver estat intervingut silvícolament, ni haver patit danys greus en els últims 5 anys. L'eliminació de peus, ja sigui per aclarides o per una pertorbació natural (vent, incendis...) té un efecte d'alliberament sobre els arbres que resten en peu, de manera que el seu creixement s'accelera (GÓMEZ i MONTERO, 1989). Per controlar aquest efecte, s'han exclòs de l'inventari aquests tipus de rodals.

6. No s'han d'utilitzar els rodals on s'hagi practicat selecció negativa, ja que té un efecte negatiu en la modelització del creixement forestal. Els creixements mesurats en masses sotmeses a aquest tractament són sempre inferiors als d'una massa d'estructura equivalent gestionada mitjançant criteris silvícoles (GRÀCIA, 1993 a ROMÀ, 2002).

La cartografia del Pla Tècnic de Gestió i Millora Forestal (JÜRGENS, 2000), va ser útil per a tenir una idea de les característiques silvícoles de la massa en cada zona. Després d'aquesta primera caracterització a gabinet, es va realitzar una prospecció del terreny per localitzar rodals que complissin els criteris exposats anteriorment. Per això, es va comptar amb l'ajuda del Guarda Forestal del Parc.

Per a cada rodal seleccionat es van obtenir les seves coordenades amb un GPS (*Geographic Positionement System*). També es va marcar el possible centre de la parcel·la amb una cinta de plàstic ben visible indicant el número de parcel·la i es va anotar a la fitxa de camp una breu descripció de l'itinerari d'accés. Això i el sistema de navegació que porta incorporat el GPS, van permetre localitzar ràpidament les parcel·les quan es va tornar a fer el posterior inventari.

Es va seleccionar visualment un dels arbres més gruixuts del rodal. D'aquest es va mesurar la seva alçada amb hipsòmetre vèrtex i es va estimar la seva edat extraient un testimoni de fusta a la base del tronc amb una barrina de Pressler de 40 cm x 5 mm Ø_{int}. A partir de l'edat i l'alçada (considerada com l'alçada dominant del rodal) es va estimar gràficament l'Índex de Lloc (IS) utilitzant les corbes de qualitat de GARCIA i TELLA (1986) per al pi roig al sistema pirinenc. L'IS s'utilitza per classificar la qualitat d'estació i es defineix com l'alçada dominant que té un rodal a una determinada edat, anomenada edat de referència. Segons RODRÍGUEZ (2005) la fixació d'aquesta edat pròxima a la meitat del torn estima amb millor precisió l'IS en masses joves. En aquest cas es va utilitzar una edat de referència de 60 anys al tractar-se, en general, de fustals joves amb una edat entre 40 i 70 anys.

El fet d'estimar l'IS a mesura que s'anaven seleccionant els rodals, va ajudar a tenir representades totes les qualitats d'estació possibles en l'inventari.

Es van seleccionar un total de 24 rodals les característiques dels quals es recullen a la **Taula 3.1**. La seva ubicació sobre el terreny es pot consultar en el mapa de l'**Annex 7.1**.

Taula 3.1: Caracterització dels rodals seleccionats per instal·lar les parcel·les.

Núm.	Coordenades UTM			Ho (m)	Edat (anys)	IS(60) (m)
	X	Y	Z			
1	433303	4663281	613	18,5	82	15,0
2	433287	4663270	626	19,2	75	17,5
3	433410	4663296	622	15,0	79	12,6
4	433390	4663952	683	17,4	41	22,0
5	433715	4663618	629	19,4	75	17,5
6	434547	4663365	682	20,9	40	26,0
7	434956	4663577	724	17,2	32	25,0
8	434998	4663614	705	17,2	40	22,6
9	434777	4663486	701	18,2	49	21,0
10	434698	4663555	694	18,0	49	20,8
11	434689	4663513	697	21,8	44	26,0
12	434558	4663883	660	16,2	65	15,4
13	434669	4663915	610	19,5	57	20,0
14	434643	4664331	695	11,9	44	15,1
15	434415	4663611	674	15,8	30	24,2
16	434480	4663690	636	16,4	38	22,4
17	434304	4663485	650	21,9	51	24,0
18	434387	4663384	677	13,5	26	25,0
19	435132	4664509	633	15,5	43	20,4
20	435128	4664531	690	15,4	80	12,6
21	435019	4664390	687	18,1	45	21,9
22	435772	4663668	679	16,0	77	13,4
23	435562	4663634	656	16,1	45	20,5
24	433746	4663642	619	19,3	80	15,8

3.1.2 SEGONA FASE: REPLANTEIG DE LES PARCEL·LES I INVENTARI DE DIÀMETRES

Es van establir 24 parcel·les temporals, una per rodal. En un principi, s'havia pensat en replantejar parcel·les concèntriques com les utilitzades en l'Inventari Forestal Nacional. Cada parcel·la estaria formada per tres subparcel·les circulars concèntriques amb radis de 5, 10 i 15 m. Els diàmetres mínims inventariables haurien estat de 75, 125 i 275 mm respectivament. Actualment es tendeix a utilitzar aquest tipus de parcel·la, ja que no només té en compte el gruix dels arbres, també considera la seva distància respecte al centre de la parcel·la. El principi en què es basa aquest mètode és similar al del relascopi, de manera que a més distància, més gruixut ha de ser l'arbre per a ser inventariat. Finalment, però, les característiques del terreny (abrupte i amb molt pendent) i l'abundant sotabosc que dificultava el desplaçament, van fer impracticable realitzar aquest tipus de parcel·les i es va optar per les convencionals.

Per tant, es van replantejar parcel·les circulars de radi 10 m. Es van fer circulars en lloc de quadrades o rectangulars per minimitzar l'efecte límit (PARDE i BOUCHON, 1994). Un altre avantatge d'aquests tipus de parcel·les és que són més fàcils d'identificar en posteriors inventaris, ja que només es necessita localitzar el centre. En el nostre cas, aquest ja s'havia establert en la fase anterior, durant la selecció dels rodals. Tot i així, en alguns casos es va modificar per assegurar que el límit de la parcel·la era a més de 10 metres de qualsevol ras, camí o variació visible en l'estructura de la massa que pogués alterar la dinàmica del creixement del rodal, segons recomanen MADRIGAL *et al.* (1999).

Es van mesurar els diàmetres normals en dues direccions: una alineada amb el centre de la parcel·la i l'altra perpendicular; el diàmetre normal es va obtenir amb la mitjana de les dues mesures. Es va utilitzar una forcípula graduada per apreciar el mil·límetre. El diàmetre mínim inventariable es va establir en 75 mm. En els arbres dubtosos d'entrar dins la parcel·la es va mesurar la distància al centre amb el vèrtex. La correcció del pendent es va fer *in situ* mantenint el vèrtex a la mateixa alçada que l'emissor, col·locat al centre de la parcel·la. El vèrtex ha estat una eina molt útil tant per mesurar distàncies com alçades, ja que funciona a través de la vegetació, encara que sigui molt espessa, com és el cas de la zona d'estudi del present treball. Es tracta, a més, d'un instrument d'elevada precisió comprovada en xoperes per AUNÓS i RODRÍGUEZ (2002) i en masses naturals de pi roig i pinastre (LIZARRALDE *et al.*, 2005) (veure **Fig. 3.2**). El vèrtex, però, presenta

l'inconvenient que no funciona a prop de la serra mecànica, ja que el soroll produït pel motor interfereix en el funcionament de l'aparell que es basa en l'emissió d'ultrasons entre el vèrtex i l'emissor. Aquest fet va alentir els treballs en la següent fase, ja que impedia l'ús simultani del vèrtex i la serra mecànica.

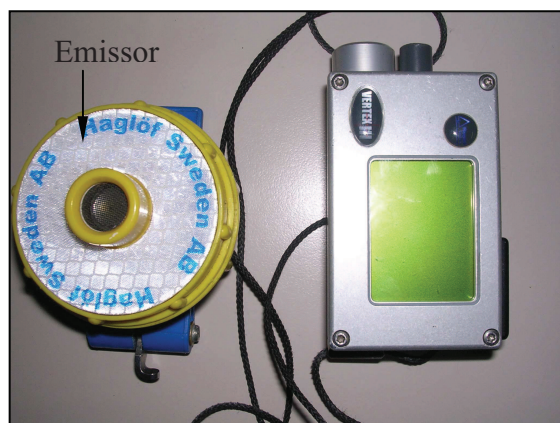


Fig. 3.2: Vèrtex: aparell utilitzat per a mesurar distàncies i alçades. (Fotografia: Óscar García).

De cada parcel·la es van prendre les següents dades (veure apartat 7.2.2):

1. Identificació de la parcel·la:

- Número de parcel·la: codi identificador.
- Coordenades UTM: adquirides amb GPS.
- Data de la presa de dades: dia-mes-any.
- Hora d'inici i hora de finalització: conèixer el temps dedicat a inventariar la parcel·la és molt útil a l'hora de planificar els treballs.

2. Fisiografia de la parcel·la:

- Exposició: orientació de la parcel·la respecte el nord magnètic.
- Pendent: mesurat amb vèrtex.
- Altitud: proporcionada pel GPS i comprovada amb un mapa topogràfic a escala 1/5.000.
- Descripció silvícola: breu descripció de les característiques més rellevants com ara l'abundància del sotabosc, la presència de soques, la capacitat de poda natural, la presència d'arbres morts en peu, etc.

3. Dasometria:

- Espècie: inicials del nom científic de l'espècie.
- Diàmetre normal: dos mesures en creu per a cada peu inventariable.

3.1.3 TERCERA FASE: EXTRACCIÓ DELS TESTIMONIS DE FUSTA I TALLADA

En aquesta fase es van mesurar arbres de 20 de les 24 parcel·les inventariades en la fase anterior. Es van descartar les parcel·les 1, 2, 14 i 20. La parcel·la 14 es va eliminar per una clara manca de regularitat detectada un cop fet l'inventari de diàmetres. D'altra banda, per manca de temps a l'hora de fer l'inventari es van haver d'eliminar les parcel·les 1, 2 i 20. Es va decidir descartar aquestes i no unes altres perquè el seu IS era igual o similar al d'altres parcel·les, per tant la qualitat d'estació d'aquestes ja estava representada en la mostra.

Es van marcar amb esprai per ser abatuts dos arbres dominants i un dominat. Per escollir-los es van seguir les indicacions de BRAVO i LIZARRALDE (2004) que defineixen un arbre dominant com aquell que té la capçada per sobre del nivell general i rep llum per dalt i parcialment pels costats. No s'han de confondre amb arbres aïllats i predominants. L'arbre dominat seria el que es troba dins del dosser arbori rebent poca llum per dalt i pràcticament res pels costats, també tindria la capçada més petita. D'aquests arbres marcats es van prendre les següents mesures abans de tallar-los:

- L'alçada total amb vèrtex, considerada com la distància mínima entre el sòl i el punt més alt de l'arbre.
- L'alçada fins a la base de la capçada amb vèrtex, considerant la base com el lloc on s'insereix el primer verticil viu.
- El diàmetre normal en creu amb forcípula.

Un cop abatuts es va mesurar amb cinta mètrica, seguint els criteris anteriors:

- L'alçada total.
- L'alçada fins a la base de la capçada.

Després es va procedir a esbrancar i trossejar els arbres abatuts. El primer tall es va fer a 1,30 m del sòl i després cada dos metres aproximadament fins arribar al diàmetre mínim aprofitable (70 mm). Es van fotografiar les seccions de les trosses amb una càmera digital a una resolució de 300 x 300 ppp. Es van mesurar els diàmetres a les puntes i al mig de cada trossa amb una forcípula i la seva longitud amb cinta mètrica.



Fig. 3.3: A l'esquerra: amidament de les trosses. A la dreta: personal del Parc abatent un arbre. (Fotografia: Óscar García).

D'altra banda, es van extreure tres testimonis de fusta per a cada parcel·la. Es van perforar dos arbres de diàmetre mig quadràtic (calculat després de fer l'inventari de diàmetres) i un arbre dominat. Les perforacions es van realitzar a 1,30 m del sòl i en una direcció a l'atzar per controlar els efectes d'excentricitat en el creixement radial del conjunt de la mostra (ROLLAND *et al.*, 1999 a ROMÀ, 2002). Dels arbres barrinats es va mesurar:

- L'alçada total amb vèrtex, considerada com la distància mínima entre el sòl i el punt més alt de l'arbre.
- L'alçada fins a la base de la capçada amb vèrtex, considerant la base com el lloc on s'insereix el primer verticil viu.
- El diàmetre normal en creu amb forcípula.

Totes les dades preses en aquesta fase es van anotar en la fitxa dendromètrica (veure apartat 7.2.3).

3.2 ANÀLISI DENDROMÈTRIC

Les mostres utilitzades en l'anàlisi dendromètric tenen dos orígens diferents, tal i com es descriu en l'apartat anterior. D'una banda s'ha disposat de 60 testimonis de fusta i de l'altra de 60 fotografies de seccions normals, totes elles obtingudes durant la tercera fase de l'inventari, a partir d'una mostra representativa de les diferents classes d'edat. L'anàlisi

dels anells de creixement és diferent per als dos tipus de mostra, tal com s'explica a continuació.

3.2.1 ANÀLISI DELS TESTIMONIS DE FUSTA

Els testimonis de fusta obtinguts amb la barrina es van precintat amb plàstic per evitar el seu trencament durant la manipulació i posterior transport. Cada testimoni es va identificar amb un codi de 3 dígits: els dos primers referents al número de parcel·la i l'últim al número d'arbre que es correspon amb el codi assignat a l'arbre en la fitxa dendromètrica.

Per obtenir les amplades de cada anell de creixement es necessita un període d'assecatament previ, així com una preparació exhaustiva dels testimonis de fusta (ROMÀ, 2002). Per això, al laboratori es va retirar el plàstic dels testimonis i es van deixar un parell de dies sobre una safata per permetre l'assecatament de la fusta.

Un cop assecats els testimonis, es va procedir a la preparació de les mostres. En primer lloc, es van reparar aquells testimonis que havien sofert trencaments, unint els fragments amb cola blanca. Els trencaments es poden produir durant l'extracció i el transport, però també durant el procés d'assecatament de la fusta degut a les tensions que s'hi generen. Per a preparar la superfície de lectura, els testimonis es van fixar a un llistó de fusta amb un canal central (veure **Fig. 3.4**). Es van llisar amb paper de vidre de diferent gra: primer es va utilitzar un paper de gra més gruixut i després un de més fi. Aquest mètode provoca un doble efecte: se suavitza la superfície de lectura i a la vegada la pols que es desprèn es diposita al lumen de les traquèides, amb la qual cosa es distingeixen millor els anells (ROMÀ, 2002). Alguns testimonis de fusta presentaven els últims anells de creixement molt fins, de manera que resultava difícil apreciar-los a simple vista. En aquests casos es va utilitzar una lupa òptica per visualitzar-los i amb un punxó es va fer una senyal al cinquè anell de creixement per a tenir-lo identificat.

Les mostres preparades es van escanejar a una resolució de 300 x 300 ppp per poder ser tractades amb el programa ImageJ versió 1.32j. Amb aquest programa de tractament d'imatges es va realitzar la lectura dels anells de creixement per a obtenir l'edat de l'arbre i el seu creixement en els últims 5 anys.

L'edat de l'arbre es va estimar comptant el nombre d'anells de creixement. En aquells testimonis de fusta en els quals no s'havia passat pel centre de l'arbre, es van estimar els

anells de creixement que faltaven visualment, tenint en compte la distància mitja entre els anells i la curvatura de l'últim.

Per obtenir el creixement dels últims 5 anys, es va mesurar el gruix dels últims 5 anells mitjançant una eina del programa ImageJ que permet calcular distàncies. En aquelles imatges on els últims anells no s'apreciaven, es tenia la referència de la marca feta al cinquè anell amb el punxó.



Fig. 3.4: Testimoni de fusta fixat a un llistó i amb la superfície de lectura llimada. Els anells de creixement es distingeixen nítidament. (Fotografia: Laura Farré).

3.2.2 ANÀLISI DE LES FOTOGRAFIES DE SECCIONS NORMALS

Les fotografies de les seccions normals es van obrir amb el programa ImageJ i es va procedir a la lectura dels anells de creixement de la mateixa manera que s'ha descrit per a les imatges dels testimonis.

En les seccions, a diferència dels testimonis de fusta, es pot veure si els anells de creixement presenten o no excentricitat. En els casos amb una marcada excentricitat, es van realitzar dues mesures de la distància entre els últims 5 anells, en dues zones diferents de la secció agafades a l'atzar. El valor del creixement dels últims 5 anys es va obtenir com la mitjana de les dues mesures. Es va observar que l'excentricitat és produïda per diferències en el gruix dels primers anells formats, corresponents a la fusta juvenil. En canvi, els últims anells presenten un gruix bastant homogeni al llarg del seu perímetre, de manera que el creixement dels últims 5 anys no varia significativament encara que hi hagi excentricitat (veure **Fig. 3.5**).

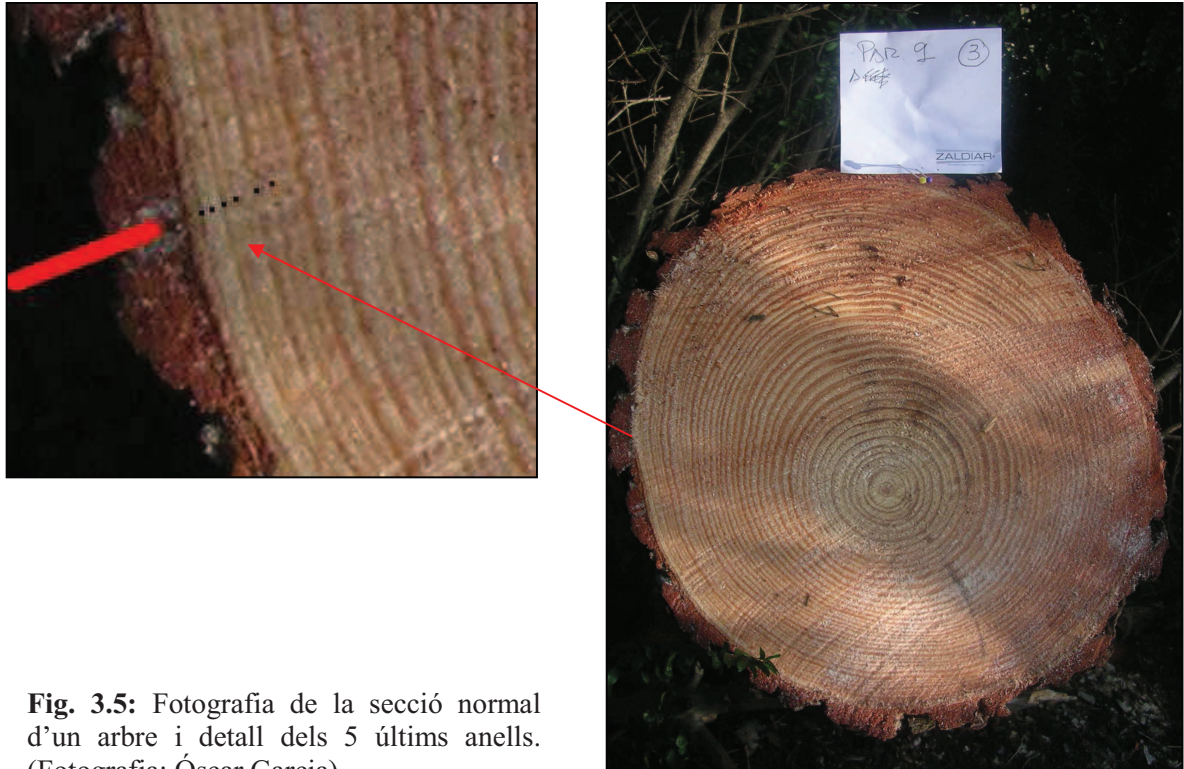


Fig. 3.5: Fotografia de la secció normal d'un arbre i detall dels 5 últims anells. (Fotografia: Óscar Garcia).

3.3 ANÀLISI ESTADÍSTICA DE FUNCIONS ALÇADA-DIÀMETRE

En la **Fig. 3.6** es pot veure un esquema del procediment seguit en l'anàlisi estadística.

3.3.1 CÀLCUL I DESCRIPCIÓ DE LES VARIABLES

A partir de l'inventari es va obtenir una base de dades formada per un total de 970 observacions que constituïen la mostra de diàmetres normals (d), a partir dels quals es van calcular les següents variables per a cada parcel·la:

- L'àrea basal total (G) en m^2/ha . Es defineix com la suma de les seccions normals (a 1,30 m del terra) de tots els peus inventariables de la parcel·la, expressada per unitat de superfície.
- La densitat (N) en peus/ha. És el nombre de peus d'almenys 7,5 cm de diàmetre normal per unitat de superfície.
- El diàmetre mig quadràtic (d_g) en cm. Es defineix com el diàmetre de l'arbre d'àrea basal mitja.

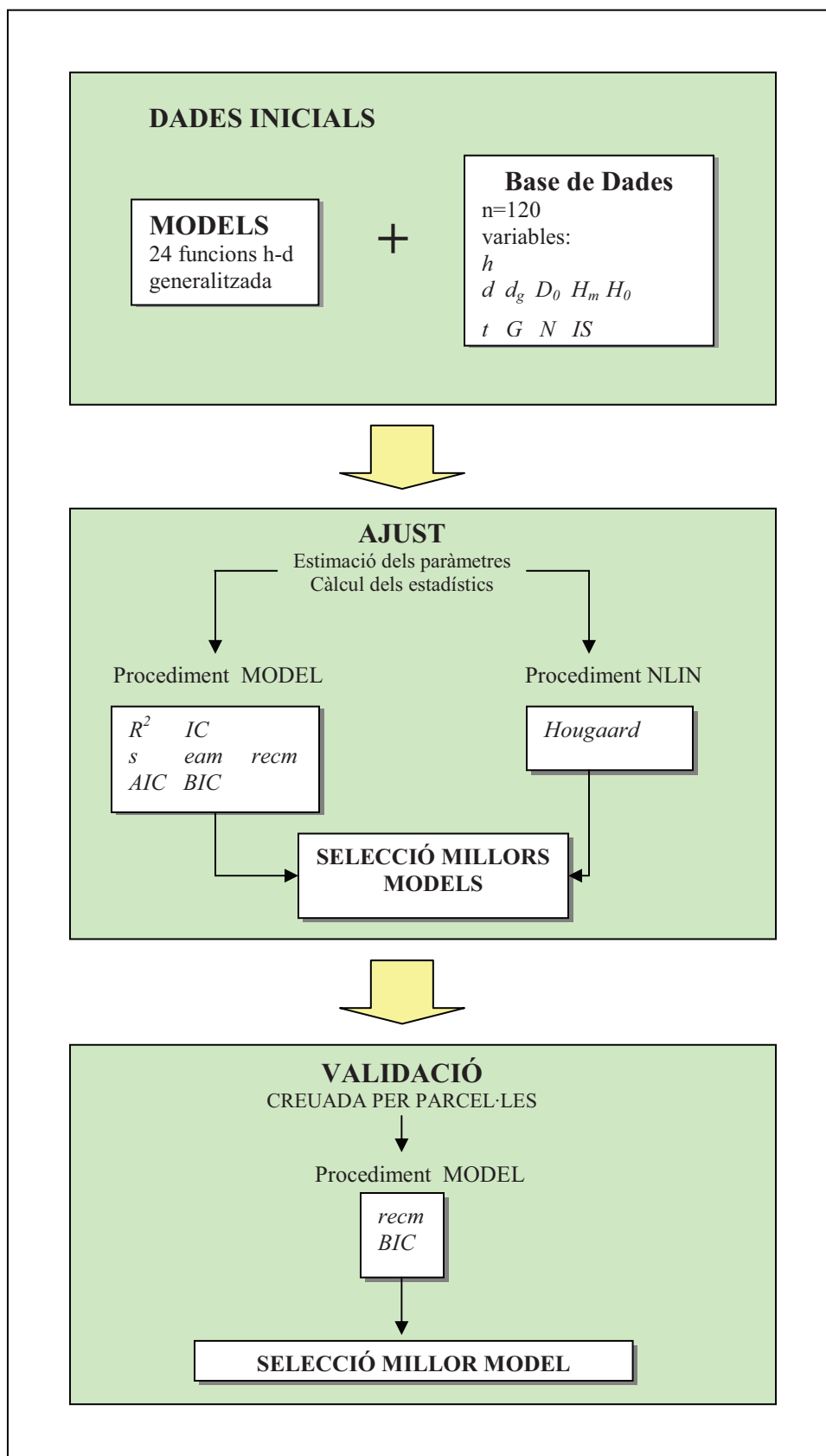


Fig. 3.6: Esquema del procediment seguit en l'anàlisi estadística de funcions alçada-diàmetre.

D'altra banda, es va obtenir una submostra constituïda per una total de 120 arbres (6 arbres tipus per parcel·la dels quals 2 són dominants, 2 dominats i 2 de diàmetre mig quadràtic). D'aquests es va mesurar l'alçada total (h), el seu corresponent diàmetre normal (d) i l'edat (veure apartat 3.2). Amb aquestes dades es va calcular per a cada parcel·la:

- L'alçada mitja (H_m) en m. Calculada com la mitjana de l'alçada dels sis arbres tipus de cada parcel·la.
- L'alçada dominant (H_0) en m. Calculada com la mitjana de les alçades dels dos arbres dominants per parcel·la.
- El diàmetre dominant (D_0) en cm. Calculat a partir de la mitjana dels diàmetres normals dels dos arbres dominants per parcel·la.
- L'edat de la massa (t) en anys. Estimada a partir de la mitjana de l'edat dels sis arbres tipus per parcel·la.
- L'Índex de lloc (IS) en m. Obtingut a partir de l'alçada dominant (H_0) i l'edat de la massa (t) i utilitzant les corbes de qualitat de GARCIA i TELLA (1986) a una edat de referència de 60 anys.

La **Taula 3.2** i la **Taula 3.3** mostren els estadístics descriptius de les variables a nivell d'arbre i les variables a nivell de parcel·la respectivament.

Taula 3.2: Estadístics descriptius de les variables a nivell d'arbre. Mitjana aritmètica (M), mínim (MIN), màxim (MAX), 1r quartil (1rQ), mediana (MED), 2n quartil (2nQ), desviació típica (DT) i coeficient de variació (CV). La mida de la mostra (n) és el nombre d'arbres mesurats.

$n = 120$								
Variable	M	MIN	MAX	1r Q	MED	2n Q	DT	$CV (\%)$
h (m)	15,52	8,00	21,90	13,75	15,35	17,55	2,85	18,34
d (cm)	20,90	8,75	36,60	15,45	20,35	25,22	6,51	31,14

Taula 3.3: Estadístics descriptius de les variables a nivell de parcel·la. Mitjana aritmètica (*M*), mínim (*MIN*), màxim (*MAX*), 1r quartil (1rQ), mediana (*MED*), 2n quartil (2nQ), desviació típica (*DT*) i coeficient de variació (*CV*). La mida de la mostra (*n*) és el nombre de parcel·les.

<i>n</i> = 20								
Variable	<i>M</i>	<i>MIN</i>	<i>MAX</i>	1r Q	<i>MED</i>	2n Q	<i>DT</i>	<i>CV</i> (%)
<i>G</i> (m ² /ha)	42,21	25,42	66,24	39,68	41,97	45,33	8,79	20,83
<i>d_g</i> (cm)	21,38	12,23	27,06	19,33	21,86	23,82	3,55	16,60
<i>D₀</i> (cm)	27,00	19,03	34,75	23,90	26,71	29,07	4,36	16,15
<i>H₀</i> (m)	16,66	13,70	21,20	15,37	16,37	17,57	1,95	11,69
<i>H_m</i> (m)	15,52	10,40	18,77	14,60	15,37	16,89	1,96	12,64
<i>t</i> (anys)	46,84	26	73	37,50	43,17	53,33	13,66	29,16
<i>N</i> (peus/ha)	1246,18	732	2165	939,01	1161,83	1352,82	412,98	33,14
<i>IS</i> (m)	20,27	23,80	13,00	17,9	21,9	23,00	3,42	16,86

3.3.2 MODELS ANALITZATS

Es van analitzar un total de 24 models per estimar l'alçada total de l'arbre individual, tots ells utilitzats per LÓPEZ *et al.* (2003) per a *Pinus radiata* a Galícia. Es tracta de models que estableixen una relació alçada-diàmetre generalitzada, per tant hi intervenen variables de massa. Aquests models són més adequats per a la zona d'estudi que els models locals i aporten millors resultats, tal i com s'explica a l'apartat 1.3.3.

La formulació matemàtica dels models analitzats es presenta a la **Taula 3.4**. Aquests models es poden dividir en tres grups en funció de l'esforç de mostreig necessari per obtenir les variables que intervenen en la seva formulació:

- Grup 1. Baix esforç de mostreig: són els models que inclouen el diàmetre normal i, en alguns casos, l'edat de la massa.
- Grup 2. Esforç de mostreig intermig: es tracta dels models que, a més d'incloure el diàmetre, també necessiten una mostra d'alçades.
- Grup 3. Elevat esforç de mostreig: són els models que engloben dades de diàmetre, d'alçada i d'edat de la massa.

Taula 3.4: Expressió matemàtica dels models alçada-diàmetre analitzats. Els models es presenten ordenats alfabèticament.

Autor/s	Grup	Expressió matemàtica	
Bennet i Clutter	3	$h = e^{\left(b_0 + b_1 \cdot IS + b_2 \cdot \frac{N}{100} + b_3 \cdot \frac{1}{t} + b_4 \cdot \frac{1}{d}\right)}$	[3.1]
Burkhart i Strub	3	$h = e^{\left(b_0 + b_1 \cdot \ln H_0 + b_2 \cdot \frac{1}{t} + b_3 \cdot \frac{\ln N}{d} + b_4 \cdot \frac{1}{d \cdot t} + b_5 \cdot \frac{1}{d}\right)}$	[3.2]
Cañadas <i>et al.</i> I	2	$h = 1.3 + (H_0 + 1.3) \left(\frac{d}{D_0}\right)^{b_0}$	[3.3]
Cañadas <i>et al.</i> II	2	$h = 1.3 + \frac{d}{\frac{D_0}{H_0 - 1.3} + b_0 \cdot (D_0 - d)}$	[3.4]
Cañadas <i>et al.</i> III	2	$h = 1.3 + (H_0 - 1.3) \frac{1 - e^{b_0 \cdot d}}{1 - e^{b_0 \cdot D_0}}$	[3.5]
Cañadas <i>et al.</i> IV	2	$h = 1.3 + \left[b_0 \cdot \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D_0} \right) + \left(\frac{1}{H_0 - 1.3} \right)^{1/2} \right]^{-2}$	[3.6]
Castedo <i>et al.</i> modificat	2	$h = 1.3 + \frac{b_0 \cdot H_0^{b_1} \cdot (H_0 - 1.3)}{\left(\left \frac{D_0 - d}{d} \right \right)^{b_2}}$	[3.7]
Clutter i Allison	1	$h = 1.3 + 10^{\left(b_0 + b_1 \cdot \frac{1}{d} + b_2 \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} + b_3 \cdot \frac{1}{d \cdot \sqrt{t}} + b_4 \cdot \frac{\log N}{\sqrt{t}}\right)}$	[3.8]
Cox I	1	$h = e^{(b_0 + b_1 \cdot \ln d_g + b_2 \cdot \ln N + b_3 \cdot \sqrt{d})}$	[3.9]
Cox II modificat 1	2	$h = b_0 + b_1 \cdot H_m + b_2 \cdot d_g^{0.95} + b_3 \cdot e^{-0.08 \cdot d} + b_4 \cdot H_m^3 \cdot e^{-0.08 \cdot d} + b_5 \cdot d_g^3 \cdot e^{-0.08 \cdot d}$	[3.10]
Cox II modificat 2	2	$h = b_0 + b_1 \cdot H_m + b_2 \cdot d_g + b_3 \cdot e^{b_4 \cdot d} + b_5 \cdot H_m^{b_6} \cdot e^{b_4 \cdot d} + b_7 \cdot d_g^{b_8} \cdot e^{b_4 \cdot d}$	[3.11]

Cox III modificat	2	$h = H_m \cdot \left[\begin{array}{l} b_0 + b_1 \cdot H_m + b_2 \cdot \frac{H_m}{d_g} + b_3 \cdot d + \\ + b_4 \cdot \frac{N}{\frac{d_g \cdot (H_m \cdot d_g)}{d}} \end{array} \right]$	[3.12]
Curtis	1	$h = 10^{\left(b_0 + b_1 \cdot \frac{1}{d} + b_2 \cdot \frac{1}{t} + b_3 \cdot \frac{1}{d_g \cdot t} \right)}$	[3.13]
Gaffrey	2	$h = 1.3 + (H_0 - 1.3) \cdot e^{b_0 \cdot \left(1 - \frac{d_g}{d} \right) + b_1 \cdot \left(\frac{1}{d_g} - \frac{1}{d} \right)}$	[3.14]
Harrison <i>et al.</i>	2	$h = H_0 \cdot \left(1 + b_0 \cdot e^{b_1 \cdot H_0} \right) \cdot \left(1 - e^{\frac{-b_2 \cdot d}{H_0}} \right)$	[3.15]
Hui i Gadow	2	$h = 1.3 + b_0 \cdot H_0^{b_1} \cdot d^{b_2 \cdot H_0^{b_3}}$	[3.16]
Mirkovich	2	$h = 1.3 + (b_0 + b_1 \cdot H_0 - b_2 \cdot d_g) \cdot e^{-b_3/d}$	[3.17]
Mønness	2	$h = 1.3 + \left[b_0 \cdot \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D_0} \right) + \left(\frac{1}{H_0 - 1.3} \right)^{1/3} \right]^{-3}$	[3.18]
Pascoa	3	$h = b_0 \cdot H_0^{b_1} \cdot G^{b_2} \cdot N^{b_3} \cdot e^{\frac{b_4}{t} + \frac{b_5}{d}}$	[3.19]
Pienaar modificat	2	$h = b_0 \cdot H_0 \cdot \left(1 - e^{\frac{-b_1 \cdot d}{d_g}} \right)^{b_2}$	[3.20]
Schröder i Álvarez I	2	$h = 1.3 + (b_0 + b_1 \cdot H_0 - b_2 \cdot d_g) \cdot e^{-b_3/\sqrt{d}}$	[3.21]
Schröder i Álvarez II	2	$h = 1.3 + (b_0 + b_1 \cdot H_0 - b_2 \cdot d_g + b_3 \cdot G) \cdot e^{-b_4/\sqrt{d}}$	[3.22]
Sloboda <i>et al.</i>	2	$h = 1.3 + (H_m - 1.3) \cdot e^{\left(b_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{d_g} \right) \right) \cdot b_1 \cdot \left(\frac{d}{d_g} - \frac{1}{d} \right)}$	[3.23]
Tomé	2	$h = H_0 \cdot e^{\left(b_0 + b_1 \cdot H_0 + b_2 \cdot \frac{N}{1000} + b_3 \cdot t \right) \cdot \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D_0} \right)}$	[3.24]

La terminologia emprada és la mateixa que en el càlcul i descripció de les variables:

h : alçada total (m).

d : diàmetre normal amb escorça (cm).

G : àrea basal total de la parcel·la (m^2/ha).

d_g : diàmetre mig quadràtic, amb escorça, de la parcel·la (cm).

D_0 : diàmetre dominant, amb escorça, de la parcel·la (cm).

H_0 : alçada dominant de la parcel·la (m).

H_m : alçada mitja de la parcel·la (m).

t : edat de la parcel·la (anys).

N : densitat de la parcel·la (peus/ha).

IS : índex de lloc (m).

b_i : paràmetres a estimar en els ajusts.

3.3.3 AJUST I VALIDACIÓ DELS MODELS

Els models analitzats són no-lineals i es van ajustar amb el procediment MODEL del paquet estadístic SAS/ETSTM (2001), el qual estima els valors dels paràmetres mitjançant el mètode de màxima versemblança. També es van obtenir els residus (e_i) que es defineixen com la diferència entre el valor observat de l'alçada total (y_i) i el valor estimat pel model ($\hat{y}_i$).

Per avaluar la bondat d'ajust dels models es van analitzar gràficament i numèrica els residus. Per a l'anàlisi gràfica es van construir les gràfiques de residus respecte als valors estimats de l'alçada total: $e_i = f(\hat{y}_i)$. La interpretació d'aquests gràfics ens informa sobre l'adequació del model per a les dades de la mostra.

D'altra banda, per a l'anàlisi numèrica es van calcular els següents estadístics, la formulació matemàtica dels quals es presenta a la **Taula 3.5** (RODRÍGUEZ, 2005):

- El biaix mitjà (s) que avalua la desviació del model respecte els valors observats.
- L'error absolut mig (eam) i l'arrel de l'error quadràtic mig ($recm$) que analitzen la precisió de les estimacions.
- El coeficient de determinació (R^2) que representa la part de la variància explicada pel model, és a dir, mesura la capacitat predictiva del model.

- El criteri d'informació d'Akaike (*AIC*) i el criteri Bayesià d'informació (*BIC*) que s'utilitzen per a seleccionar el millor model. La diferència entre tots dos criteris és que el *BIC* selecciona models més parsimoniosos, és a dir, amb menor nombre de paràmetres que el *AIC*. Per aquesta raó el criteri *BIC* és el recomanat per PEÑA (2002).

Taula 3.5: Expressió matemàtica dels estadístics calculats per avaluar la bondat d'ajust dels models on $\bar{y}_i$ és la mitjana de les alçades mesurades; n el nombre d'observacions; p el nombre de paràmetres del model; i $\hat{\sigma}^2$ la mitja de quadrats d'error del model.

Estadístic	Expressió matemàtica
Biaix mitjà	$s = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad [3.25]$
Error absolut mig	$eam = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i }{n} \quad [3.26]$
Arrel de l'error quadràtic mig	$recm = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}} \quad [3.27]$
Coefficient de determinació	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad [3.28]$
Criteri d'informació d'Akaike	$AIC = n \cdot \ln \hat{\sigma}^2 + 2 \cdot p \quad [3.29]$
Criteri Bayesià d'informació	$BIC = n \cdot \ln \hat{\sigma}^2 + p \cdot \ln(n) \quad [3.30]$

Per estudiar la colinealitat es va utilitzar el màxim índex de condició (*IC*), que avalua la correlació entre paràmetres. Valors d'aquest índex al voltant de 10 indiquen una colinealitat dèbil i valors a partir de 100 indiquen que les estimacions es poden veure afectades. PEÑA (1989) proposa un límit de 30 a partir del qual la colinealitat es considera elevada.

Finalment, per analitzar el comportament dels paràmetres en models no-lineals, es va comprovar la seva linealitat mitjançant l'estadístic de Hougaard (H), el qual analitza l'asimetria de la seva distribució. Segons RATKOWSKY (1990), si el valor d'aquest estadístic és menor de 0,1 el comportament del paràmetre és pràcticament lineal; si està comprès entre 0,1 i 0,25 ho és raonablement; mentre que si és superior a 1 la seva no-linealitat és considerable, de manera que l'estimador pot ser esbiaixat i difícilment interpretable. Per obtenir aquest estadístic es va utilitzar el procediment NLIN del paquet estadístic SAS/STATTM (2001), ja que el procediment MODEL no calcula aquest estadístic.

Un cop obtinguts els estadístics per a cada model, es van seleccionar els més adequats mitjançant un mètode objectiu sistematitzat, a partir d'una taula de decisió que es va construir seguint els següents passos:

1. S'avaluen els models per a un determinat estadístic, per això s'ordenen en columna de millor a pitjor en funció del valor que presenten per aquest estadístic. Com més baix és el valor de l'estadístic millor és el model, a excepció de R^2 que és a la inversa. En el cas del biaix mitjà s'ha d'utilitzar el valor absolut d'aquest, perquè interessa que sigui el més pròxim a zero possible.
2. Es puntuen els models assignant un 1 al millor model, un 2 al següent millor i així successivament. Quan diferents models presenten el mateix valor de l'estadístic se'ls assigna la mateixa puntuació. Així els millors models per a l'estadístic que s'avalua seran els que presentin una puntuació més baixa i els pitjors seran els que tinguin una puntuació alta.
3. Es fa el mateix procediment per a cada estadístic i s'obté una taula on les columnes són els estadístics, les files són els models i els valors de la taula són les puntuacions assignades.
4. Finalment, se sumen els punts de cada model, és a dir, els valors de les files i es col·loquen en una columna que representarà la puntuació global del model per a tots els estadístics.

Un cop construïda la taula de decisió, es van seleccionar els models més adequats, és a dir, aquells que presentaven una puntuació global dels estadístics més baixa. Aquests van ser els models que posteriorment es van validar.

El tipus de validació aplicada va ser la validació creuada (*cross-validation*), enfront de la fragmentació de la mostra (*split-sample*). Els dos mètodes permeten calcular l'error de predicció dels models i, per tant, seleccionar com a millor model aquell que presenta un menor error. En l'*split-sample* la mostra es fragmenta en dos submostres, una per a l'ajust i l'altra per a la fase de validació. Això implica que es requereixi una mostra molt gran, i per tant, un esforç de mostreig elevat. La validació creuada no presenta aquest inconvenient, ja que utilitza tota la mostra tant per a l'ajust com per a la validació.

En aquest cas, es va realitzar una validació creuada per parcel·la i no per arbre, ja que en la construcció dels models intervenen variables de massa que presenten el mateix valor per a tots els arbres d'una mateixa parcel·la. A més, les dades d'una mateixa parcel·la estan correlacionades ja que es tracta d'una zona homogènia. El procediment consisteix en l'ajust k vegades de k submostres on en cada submostra s'han eliminat les observacions corresponents a una determinada parcel·la (k és el nombre de parcel·les, en aquest cas). Això significa que primer s'ajusta el model amb totes les dades de la mostra menys amb les dades d'una parcel·la, es construeix el model i s'estimen els valors de l'alçada total dels arbres corresponents a la parcel·la que no ha format part de l'ajust. Els valors predits de l'alçada total es comparen amb els valors observats per a obtenir els residus. Aquest procés es repeteix tants cops com nombre de parcel·les.

Per analitzar la bondat de la validació es van calcular els següents estadístics: l'arrel de l'error quadràtic mitjà (*recm*) i el criteri Bayesià d'informació (*BIC*). Es van comparar els valors d'aquests estadístics pels diferents models i es va seleccionar aquell amb més bons resultats, és a dir, el que presentava un valor més baix dels estadístics.

Un cop seleccionat el model es va mesurar la seva robustesa [3.31] que equival a comparar el valor del *recm* de la validació amb el valor obtingut del mateix estadístic en l'ajust. Els dos valors han de ser similars, és a dir, la robustesa ha de ser pròxima a 1, això indica que el model és extrapolable a altres mostres i, per tant, aplicable en posteriors inventaris que es puguin realitzar a la zona.

$$\text{Robustesa} \quad \gamma = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{i(i)})^2} \quad [3.31]$$

3.4 ANÀLISI ESTADÍSTICA DE MODELS DE CREIXEMENT EN DIÀMETRE

En la **Fig. 3.7** es pot veure un esquema del procediment seguit en l'anàlisi estadística.

3.4.1 CÀLCUL I DESCRIPCIÓ DE LES VARIABLES

Les variables dependents analitzades són: el creixement radial mig dels últims 5 anys (*CRM5*) i el creixement en secció mig dels últims 5 anys (*CSM5*).

El creixement radial anual depèn fortament de la climatologia. Per compensar aquest efecte es va treballar amb creixements radials mitjos (MONSERUD i STERBA, 1996). El període de 5 anys es va escollir perquè és el període mínim considerat en la bibliografia consultada. La variable *CRM5* es va obtenir a partir de l'anàlisi dendromètrica dels testimonis de fusta i de les fotografies de les seccions normals (veure apartat 3.2).

Per altra banda, les dades de creixement radial es van transformar en valors de creixement en secció per incrementar l'explicabilitat dels models a obtenir (ROMÀ, 2002). Per a determinar el *CSM5* es va suposar que el creixement en superfície adopta la forma d'una corona circular (MONSERUD i STERBA, 1996). Es va calcular la diferència entre la secció actual (S_x) i la secció que presentava l'arbre 5 anys enrera (S_{x-5}). El valor de les seccions es va obtenir a partir del diàmetre normal actual (d_x) i del diàmetre normal de l'arbre fa 5 anys (d_{x-5}), respectivament. Aquesta última variable es va calcular restant dues vegades el *CRM5* al diàmetre normal actual (veure **Fig. 3.8**).

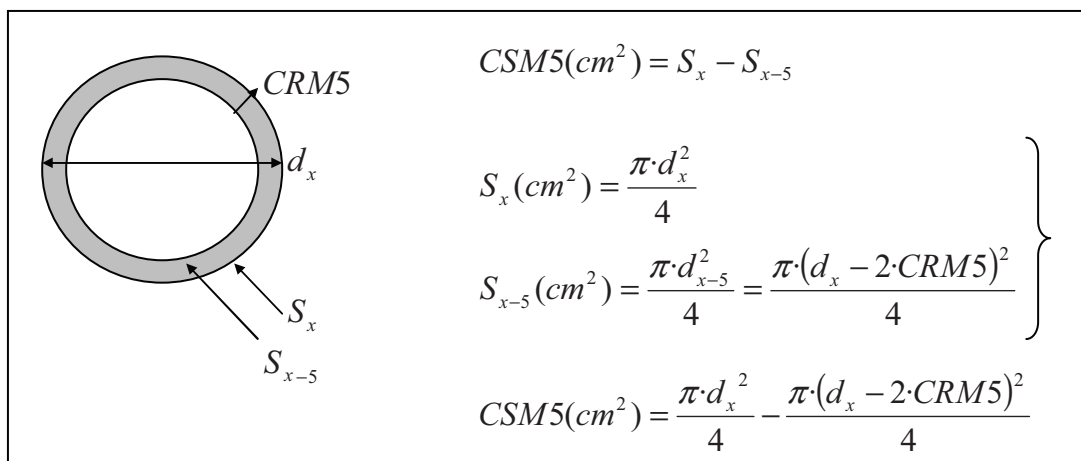


Fig. 3.8: Càlculs realitzats per obtenir la variable dependent *CSM5*.

Totes dues variables, *CRM5* i *CSM5*, es refereixen al creixement que s'ha produït en un període de 5 anys. Si es volen obtenir en valors de creixement anual mig, s'han de dividir les variables per 5.

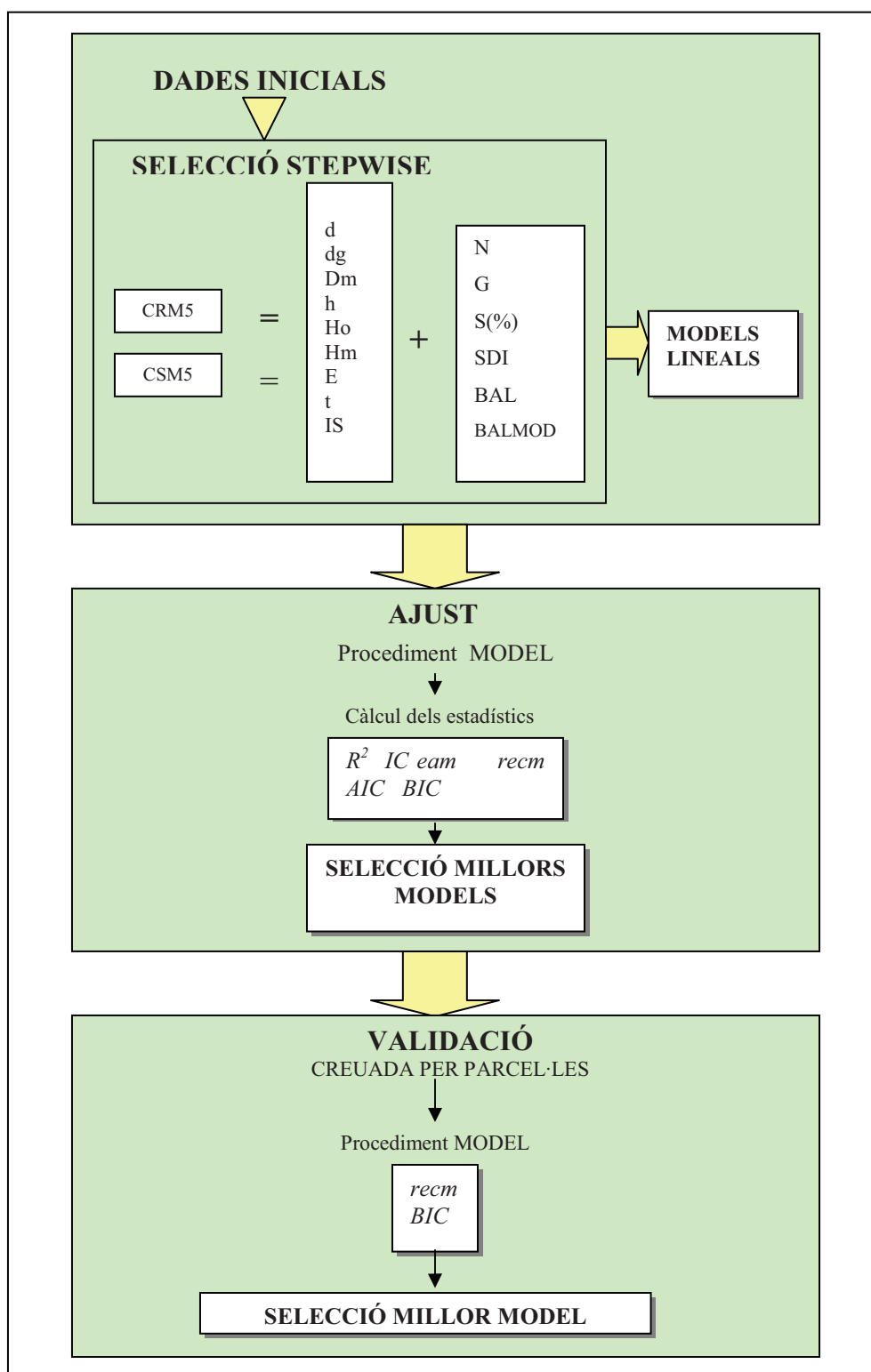


Fig. 3.7: Esquema del procediment seguit en l'anàlisi estadística dels models de creixement en diàmetre.

Les variables independents o explicatives es van seleccionar en funció dels factors que influeixen en el creixement seguint a COOK (1987) i WYKOFF *et al.* (1982) a ROMÀ (2002). Moltes de les variables citades a continuació ja han estat descrites anteriorment, en l'anàlisi de les funcions alçada-diàmetre, de manera que aquí únicament s'enumeren.

➤ La mida de l'arbre:

Com a variables referents a la mida de l'arbre es van utilitzar el diàmetre normal (d) i l'alçada total (h), mesurades durant l'inventari. A partir d'aquestes es van calcular les següents variables a nivell de parcel·la: el diàmetre normal mig (D_m), el diàmetre mig quadràtic (d_g), l'alçada mitja (H_m) i l'alçada dominant (H_0). Aquestes variables han estat definides totes elles, a excepció del D_m , a l'apartat 3.3.1.

El D_m es calcula com la mitjana aritmètica dels diàmetres normals de tots els peus inventariables de la parcel·la. La unitat de mesura és el cm.

➤ L'edat:

Les variables considerades referents a l'edat són l'edat de l'arbre (E) i l'edat mitja de la massa (t). L' E es va estimar a partir de l'anàlisi dels testimonis de fusta i de les fotografies de les seccions normals obtingudes durant l'inventari. A partir d'aquesta variable es va calcular t per a cada parcel·la.

➤ La climatologia:

No es va considerar cap variable referent a aquest factor. De manera que per compensar l'efecte que la climatologia provoca en el creixement anual, es va treballar amb la mitja del creixement radial (MONSERUD i STERBA, 1996).

➤ Factors interns del bosc:

Com a variables referents als factors interns al bosc es van considerar la qualitat d'estació i la competència. La qualitat d'estació es va representar a partir de l'Índex de Lloc (IS).

Pel que fa a la competència, aquesta es va quantificar a través de l'ús d'índexs de competència. Els índexs de competència utilitzats foren Índexs independents de la

distància (*IID*), tant a nivell de massa o de rodal com a nivell d'arbre individual. Els *IID* no tenen en compte la distribució espacial dels arbres. Avaluen la competència en funció de l'espessor mig de la massa, suposant que l'espaiament és equivalent a tota la massa. Els Índexs dependents de la distància (*IDD*) no es van considerar en el present treball.

L'estudi realitzat per ROMÀ (2002) per a *Pinus sylvestris* en masses del Solsonès, conclou que els índex que es comporten millor per a explicar el creixement diametral són els *IID*. A excepció del *BAL* i el *BALMOD* que són els que aporten pitjors resultats d'entre tots els índexs testats en l'estudi.

Per a poder calcular els *IDD* cal determinar durant l'inventari la posició dels arbres dins de la parcel·la, mesurant de cada arbre el seu rumb respecte al nord i el seu mòdul (distància de l'arbre al centre). Considerant l'elevat esforç de mostreig que suposa la mesura d'aquestes variables i prenent com a referència els resultats obtinguts per ROMÀ (2002), es van considerar únicament els *IID* per a la construcció dels models. A continuació es defineixen els diferents *IID* calculats:

- La densitat (*N*) en peus/ha. És el nombre de peus d'almenys 7,5 cm de diàmetre normal per unitat de superfície. És un índex de competència a nivell de rodal.
- L'àrea basal total (*G*) en m²/ha. Es defineix com la suma de les seccions normals (a 1,30 m del terra) de tots els peus inventariables de la parcel·la, expressada per unitat de superfície. És un índex de competència a nivell de rodal.
- L'Índex d'espaiament relatiu o de Hart-Becking (*S*) en %. És un índex de competència a nivell de rodal. S'obté en aplicar la següent expressió (BRAVO *et al.*, 1997):

$$S = \frac{a}{H_0} \cdot 100 \quad [3.32]$$

On:

a: distància entre individus en m. Suposant marc real: $a = \sqrt{\frac{10.000}{N}}$

H₀: alçada dominant en m.

- L'Índex de densitat de Reineke (*SDI*). És un índex de competència a nivell de rodal. Es calcula aplicant la següent expressió (BRAVO *et al.*, 1997):

$$SDI = N \cdot \left(\frac{D_0}{d_g} \right)^{-1,605} \quad [3.33]$$

On:

N : densitat en peus/ha.

D_0 : diàmetre de referència igual a 25 cm.

d_g : diàmetre mig quadràtic de la parcel·la en cm.

- L'Índex de *BAL* en m²/ha. Obtingut per a cada arbre de la parcel·la sumant les seccions normals de tots els arbres de diàmetre superior al seu (MONSERUD i STERBA, 1996). Es tracta, doncs, d'un índex a nivell d'arbre. Aquest índex assigna un valor de zero a l'arbre més gruixut. Aquest fet, però, no s'ha de considerar com una situació de competència nul·la, sinó com un valor de referència a partir del qual s'assignen els índexs a la resta de peus (ÁLVAREZ, 1998). L'expressió matemàtica d'aquest índex és la següent:

$$BAL_{ij} = \sum_{n=1}^t \frac{\pi D_n^2}{4} \quad [3.34]$$

On:

BAL_{ij} : valor del BAL en la parcel·la i per a l'arbre j .

D_n : diàmetre normal de l'arbre n . Sempre s'ha de complir que $D_n > D_j$.

- L'Índex de *BALMOD* en m²/ha. És un índex elaborat per SCHRÖDER i GADOW (1997) a partir d'una modificació de l'anterior. Inclou un coeficient de ponderació que té en compte l'espaiament relatiu entre els peus. Aquest coeficient és l'índex de Hart-Becking. Segons alguns estudis realitzats aquest índex té un comportament millor que el de BAL (ÁLVAREZ, 1998). Es tracta també d'un índex de competència a nivell d'arbre. La expressió matemàtica és:

$$BALMOD_i = \frac{1 - \left(1 - \frac{BAL_i}{G}\right)}{S} \quad [3.35]$$

On:

BAL_i : índex de BAL per l'arbre i en m^2/ha .

G : àrea basal de la parcel·la en m^2/ha .

S : índex de Hart-Becking en tant per ú.

➤ Factors externs al bosc:

No es van tenir en compte els factors externs al bosc, com podrien ser les aclarides. Es tracta d'una massa on els últims aprofitaments es van realitzar fa aproximadament uns 40 anys. La dificultat de determinar amb exactitud l'any de les aclarides i la naturalesa de les mateixes, va fer desestimar la possibilitat de considerar aquest tipus de variable. Una condició per a l'elecció dels rodals és que no s'hagi aplicat una selecció negativa. Aquesta dada és difícil de determinar en aprofitaments realitzats fa tant de temps. D'altra banda, les últimes aclarides s'han practicat en alguns rodals en els últims 4 anys, a partir de l'any 2001. Aquests rodals, però, no es poden incloure en l'inventari a fi de controlar l'efecte d'alliberament que les aclarides produeixen sobre els arbres que resten en peu, principalment en els 5 anys posteriors a realitzar-se l'aclarida (GÓMEZ i MONTERO, 1989).

La **Taula 3.6** i la **Taula 3.7** mostren els estadístics descriptius de les variables.

Taula 3.2: Estadístics descriptius de les variables a nivell d'arbre. Mitjana aritmètica (M), mínim (MIN), màxim (MAX), 1r quartil (1rQ), mediana (MED), 2n quartil (2nQ), desviació típica (DT) i coeficient de variació (CV). La mida de la mostra (n) és el nombre d'arbres mesurats.

$n = 20$								
Variable	M	MIN	MAX	1r Q	MED	2n Q	DT	$CV (\%)$
CRM5 (mm)	5,36	0,66	13,74	2,59	4,95	6,95	3,23	60,31
CSM5 (cm^2)	36,89	2,37	136,53	13,29	27,97	50,22	29,13	78,97
h (m)	15,52	8,00	21,90	13,75	15,35	17,55	2,85	18,34
d (cm)	20,90	8,75	36,60	15,45	20,35	25,22	6,51	31,14
E (anys)	46,63	20,00	88,00	36,00	43,00	52,00	15,62	33,49
BAL (m^2/ha)	29,11	3,54	64,56	21,74	28,92	38,59	12,43	42,70
$BALMOD$	3,94	0,41	6,63	2,95	4,30	5,07	1,54	39,09

Taula 3.3: Estadístics descriptius de les variables a nivell de parcel·la. Mitjana aritmètica (*M*), mínim (*MIN*), màxim (*MAX*), 1r quartil (1rQ), mediana (*MED*), 2n quartil (2nQ), desviació típica (*DT*) i coeficient de variació (*CV*). La mida de la mostra (*n*) és el nombre de parcel·les.

<i>n</i> = 20								
Variable	<i>M</i>	<i>MIN</i>	<i>MAX</i>	1r Q	<i>MED</i>	2n Q	<i>DT</i>	<i>CV</i> (%)
<i>d_g</i> (cm)	21,38	12,23	27,06	19,33	21,86	23,82	3,55	16,60
<i>D_m</i> (cm)	20,10	11,73	25,04	17,68	20,15	22,94	3,37	16,78
<i>H₀</i> (m)	16,66	13,70	21,20	15,37	16,37	17,57	1,95	11,69
<i>H_m</i> (m)	15,52	10,40	18,77	14,60	15,37	16,89	1,96	12,64
<i>t</i> (anys)	46,84	26	73	37,50	43,17	53,33	13,66	29,16
<i>IS</i> (m)	20,27	23,80	13,00	17,9	21,9	23,00	3,42	16,86
<i>N</i> (peus/ha)	1246,18	732	2165	939,01	1161,83	1352,82	412,98	33,14
<i>G</i> (m ² /ha)	42,21	25,42	66,24	39,68	41,97	45,33	8,79	20,83
<i>S</i> (%)	17,71	13,85	22,21	15,79	17,85	19,38	2,45	13,86
<i>SDI</i>	916,03	617,87	1333,98	816,98	880,25	978,32	175,08	19,11

3.4.2 AJUST I VALIDACIÓ DELS MODELS

En les funcions alçada-diàmetre, es van utilitzar models amb l'estructura definida per altres autors, tots ells no-lineals, i es van ajustar els paràmetres a les dades de la mostra. En canvi, per als models de creixement en diàmetre, es va construir l'estructura matemàtica completament, optant per una estructura additiva seguint a autors com COOK (1987), MONSERUD i STERBA (1996) i ROMÀ (2002). Els models es van ajustar utilitzant tècniques de regressió lineal, suposant una relació lineal entre la variable dependent i les variables independents.

Per escollir les variables predictores que participen en l'estructura del model, es va seguir una estratègia de regressió tipus *Stepwise* (regressió pas a pas). Aquest mètode consisteix en afegir d'una en una les variables que són significatives en un determinat nivell de significació, que en aquest cas fou del 0,05. Un cop introduïda una nova variable, s'observen les variables incloses anteriorment en el model i s'eliminen aquelles que no són significatives. El nivell de significació escollit per a què una variable continuï en el model va ser del 0,1. Aquest procés es va realitzar amb l'aplicació SAS Enterprise Guide del programa estadístic SAS v9 (SAS INSTITUTE INC., 2005).

La inclusió d'índexs de competència en el model és bàsica per a la implementació silvícola d'aquest. Per aquest motiu, els índex de competència van ser l'únic tipus de variable explicativa que es van incloure obligatòriament en els models a construir. D'aquesta manera, es van formular dos models per a cada índex de competència: un per a cada variable dependent (*CRM5* i *CSM5*). També es van construir dos models sense tenir en compte cap índex de competència en l'estratègia de selecció i es van incloure a efectes comparatius.

Un cop seleccionades les variables explicatives que intervenen en l'estructura de cada model, segons l'índex de competència considerat i la variable dependent, els models es van ajustar amb el procediment MODEL del paquet estadístic SAS/ETSTM (2001).

La interpretació de les gràfiques de residus respecte als valors estimats va permetre verificar les hipòtesis de linealitat, d'homocedasticitat i d'independència dels residus. La normalitat es va contrastar amb el test de Kolmogorov-Smirnov. Si alguna d'aquestes condicions no es complia, es va intentar solucionar realitzant la transformació logarítmica de la variable dependent.

Per a l'anàlisi numèrica es van calcular els mateixos estadístics utilitzats en els models de predicció de l'alçada total, a excepció del biaix (*s*) i l'estadístic de Hougaard (*H*) que no es van considerar. Al tractar-se de models lineals, el biaix és sempre igual a zero. Pel que fa a l'estadístic de Hougaard s'utilitza exclusivament per a models no-lineals.

En aquest cas també es va calcular l' R^2 , en lloc de l' R^2_{adj} (coeficient de determinació ajustat). El primer és una mesura de la capacitat predictiva del model i és sensible a la introducció de noves variables al model. Mentre que el segon, no augmenta de valor amb el nombre de variables introduïdes, de manera que s'utilitza sovint com a criteri de selecció de variables. En el nostre cas, les variables que formen part del model ja havien estat seleccionades amb el procediment *Stepwise*, i el que ens interessava era obtenir una mesura de la capacitat predictiva del model.

Un cop calculats els estadístics es van seleccionar els models més adequats i aquests es van validar. Es va escollir el model que aportava uns millors resultats i finalment es va mesurar la seva robustesa. Aquest procediment s'ha descrit en l'apartat 3.3.3 per a les funcions alçada-diàmetre.

4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

4.1 RESULTATS I DISCUSSIÓ DE FUNCIONS ALÇADA-DIÀMETRE

4.1.1 RESULTATS DE L'AJUST

A partir de la mostra, que inclou dades a nivell d'arbre i a nivell de parcel·la, s'han ajustat diferents models per a predir l'alçada total de l'arbre individual. Un cop obtinguts els resultats de l'ajust, s'han descartat directament els models de *Cox II mod. 2* i *Piennar mod.* En aquests models els paràmetres estimats no s'han ajustat, és a dir, no han convergit en cap valor després de realitzar les corresponents iteracions. Com a conseqüència la colinealitat és molt elevada (el IC és superior a 1.000.000 en tots dos casos). Per tant, aquests models no són adequats per a les dades de la mostra.

Per a la resta de models, la **Taula 4.1** mostra el valor dels paràmetres estimats per l'ajust de regressió i sota d'aquest l'estadístic de Hougaard corresponent. La **Taula 4.2** mostra el valor dels estadístics d'ajust, utilitzats per avaluar la bondat d'ajust dels models. Els models es presenten ordenats alfabèticament.

Taula 4.1: Valor dels paràmetres estimats per l'ajust (b_i) amb el seu estadístic de Hougaard corresponent (H).

Model	b_0 (H)	b_1 (H)	b_2 (H)	b_3 (H)	b_4 (H)	b_5 (H)
Bennet i Clutter	2,846 (-0,01)	0,029 (0,00)	-0,001 (-0,03)	-16,717 (-0,01)	-5,766 (-0,04)	-
Burkhart i Strub	1,184 (0,01)	0,623 (0,00)	4,908 (0,01)	0,151 (0,01)	-93,275 (0,03)	-4,780 (0,01)
Cañadas <i>et al.</i> I	0,310 (0,06)	-	-	-	-	-
Cañadas <i>et al.</i> II	-0,045 (0,17)	-	-	-	-	-
Cañadas <i>et al.</i> III	-0,100 (0,23)	-	-	-	-	-
Cañadas <i>et al.</i> IV	0,830 (0,10)	-	-	-	-	-
Castedo <i>et al.</i> mod.	1,024 (1,06)	-0,061 (0,00)	0,037 (0,04)	-	-	-
Clutter i Allison	1,389 (0,02)	-3,239 (0,02)	1,462 (0,03)	0,501 (0,04)	-0,632 (0,03)	-
Cox I	-0,451 (0,00)	0,533 (0,01)	0,138 (0,01)	0,130 (0,01)	-	-
Cox II mod.1	2,918 (-)	1,256 (-)	-0,213 (-)	-6,792 (-)	-0,003 (-)	0,000 (-)
Cox III mod.	0,788 (-)	-0,012 (-)	0,155 (-)	0,013 (-)	0,003 (-)	-

Curtis	1,340 (0,00)	-2,618 (0,04)	3,430 (0,01)	-82,288 (0,08)	-	-
Gaffrey	0,224 (0,07)	1,291 (0,07)	-	-	-	-
Harrison <i>et al.</i>	0,241 (3,47)	-0,061 (0,73)	1,700 (0,29)	-	-	-
Hui i Gadow	1,325 (5,26)	0,482 (1,59)	0,206 (8,19)	0,176 (1,74)	-	-
Mirkovich	5,884 (0,10)	0,699 (0,02)	-0,102 (0,06)	6,317 (0,04)	-	-
Mønness	0,856 (0,09)	-	-	-	-	-
Pascoa	3,211 (1,52)	0,533 (0,01)	0,149 (0,02)	-0,027 (0,01)	0,221 (0,00)	-5,615 (0,03)
Shröder i Alvarez I	8,202 (0,25)	0,963 (0,12)	-0,142 (0,10)	2,906 (0,03)	-	-
Shröder i Alvarez II	6,251 (0,23)	0,943 (0,12)	-0,064 (0,11)	0,087 (0,06)	2,858 (0,03)	-
Sloboda <i>et al.</i>	-0,299 (0,02)	0,003 (0,03)	-	-	-	-
Tomé	16,913 (0,00)	-1,133 (0,02)	-3,061 (0,02)	0,007 (0,03)	-	-

Taula 4.2: Resultats dels estadístics d'ajust utilitzats per avaluar la bondat d'ajust dels models. Coeficient de determinació (R^2), índex de condició (IC), biaix mitjà (s), error absolut mig (eam), arrel de l'error quadràtic mig ($recm$), criteri d'informació d'Akaike (AIC) i criteri Bayesià d'informació (BIC).

Model	R^2	IC	s	eam	$recm$	AIC	BIC
Bennet i Clutter	0,5979	35,1	0,000	1,418	1,837	150,84	164,77
Burkhart i Strub	0,6263	121,7	0,001	1,368	1,779	144,03	160,76
Cañadas <i>et al.</i> I	0,5662	-	0,138	1,408	1,875	151,92	154,70
Cañadas <i>et al.</i> II	0,4891	-	0,337	1,556	2,035	171,56	174,35
Cañadas <i>et al.</i> III	0,5873	-	0,112	1,404	1,829	145,95	148,73
Cañadas <i>et al.</i> IV	0,5948	-	0,143	1,379	1,813	143,76	146,54
Castedo <i>et al.</i> mod.	0,4227	58,9	-0,003	1,599	2,124	180,70	189,01
Clutter i Allison	0,5123	106,8	-0,001	1,574	2,023	173,98	187,91
Cox I	0,5357	165,1	-0,005	1,568	1,965	166,09	177,24
Cox II mod.1	0,7015	90,1	0,000	1,247	1,590	117,08	133,80
Cox III mod.	0,6669	42,7	-0,002	1,329	1,672	128,24	142,17
Curtis	0,5503	18,6	0,000	1,528	1,934	162,26	173,41
Gaffrey	0,4366	11,5	-0,748	1,686	2,146	185,29	190,87
Harrison <i>et al.</i>	0,6392	21,5	-0,006	1,331	1,725	133,83	142,19
Hui i Gadow	0,6006	787,8	-0,003	1,406	1,823	148,01	159,16
Mirkovich	0,6268	26,0	0,000	1,374	1,762	139,87	151,02
Mønness	0,5925	-	0,140	1,386	1,818	144,42	147,20

Pascoa	0,6448	149,5	0,000	1,363	1,734	137,96	154,68
Shröder i Alvarez I	0,6181	26,1	-0,002	1,385	1,782	142,65	153,79
Shröder i Alvarez II	0,6345	29,5	-0,002	1,368	1,751	139,36	153,30
Sloboda <i>et al.</i>	0,6602	1,5	-0,014	1,323	1,667	124,61	130,18
Tomé	0,6230	32,3	0,118	1,305	1,771	141,08	152,23

Tots els models de *Cañadas et al.* i el model de *Mønness* són estadísticament significatius en els seus paràmetres, mentre que la resta de models assajats no ho són en algun o en cap dels seus paràmetres. Pel que fa a la capacitat predictiva del model, que representa la part de la variància explicada pel model i es mesura amb el coeficient de determinació (R^2), aquesta oscil·la entre el 42 % i el 70 % en el cas més elevat (el model de *Cox II mod. I*). Aquests valors es consideren acceptables i són normals en mostres procedents d'un inventari forestal.

L'índex de condició (*IC*) és menor de 10 en el model de *Sloboda et al.*, per tant la colinealitat entre paràmetres és dèbil. Es troba entre 10 i 30 en els models de *Curtis*, *Gaffrey*, *Harrison et al.*, *Mirkovich* i els dos models de *Shröder i Álvarez*. Això indica que aquests models presenten una colinealitat moderada. La resta presenta un *IC* superior a 30, és a dir, una elevada colinealitat que, segons PEÑA (1989), pot afectar a les estimacions dels paràmetres. En els models de *Cañadas* i el model de *Mønness* no té sentit avaluar la colinealitat, ja que tenen únicament un paràmetre.

Pel que fa a l'estadístic de Hougaard (*H*), els models de *Harrison et al.* i *Pascoa* presenten un dels seus paràmetres amb un comportament que s'allunya molt de la linealitat ($H > 1$). El cas més extrem és el model de *Hui i Gadow* que presenta tots els seus paràmetres amb $H > 1$. La resta de models tenen tots els seus paràmetres amb $H < 0,1$ o algun amb *H* comprès entre 0,1 i 0,25. Això indica que els paràmetres d'aquests models tenen un comportament que no s'allunya de la linealitat i, per tant, els estimadors no estaran esbiaixats. Per als models de *Cox II mod. I* i *Cox III* no té sentit calcular l'estadístic de Hougaard, ja que es tracta de models amb una formulació lineal en quant als seus paràmetres. Això es pot comprovar realitzant les derivades parcials de l'equació del model respecte a cada paràmetre i observant que aquestes no depenen dels paràmetres.

Els gràfics de residus no presenten una estructura definida, fet que indica que els models són adequats per a les dades de la mostra. La variància és homogènia al llarg dels valors predits pel model amb el que cal suposar que són homocedàstics (veure **Annex 7.3.1**).

Per a seleccionar els models més adequats s'ha utilitzat una metodologia objectiva consistent en construir una taula de decisió, els resultats de la qual es presenten a la **Taula 4.3**.

Taula 4.3: Taula de decisió utilitzada per a seleccionar els models més adequats. Coeficient de determinació (R^2), índex de condició (IC), biaix mitjà (s), error absolut mig (eam), arrel de l'error quadràtic mig ($recm$), criteri d'informació d'Akaike (AIC) i criteri Bayesià d'informació (BIC).

Model (grup)	R^2	IC	s	eam	$recm$	AIC	BIC	Puntuació global
Cox II mod. 1 (2)	1	17	1	1	1	1	2	24
Sloboda <i>et al.</i> (2)	3	6	15	3	2	2	1	32
Cox III mod. (2)	2	15	8	4	3	3	3	38
Harrison <i>et al.</i> (2)	5	9	14	5	4	4	4	45
Mirkovich (2)	7	10	1	9	7	7	8	49
Pascoa (3)	4	20	1	6	5	5	12	53
Schröder i Álvarez II (2)	6	12	8	7	6	6	10	55
Tomé (2)	9	13	17	2	8	8	9	66
Cañadas <i>et al.</i> IV (2)	13	1	20	10	11	10	5	70
Schröder i Álvarez I (2)	10	11	8	11	10	9	11	70
Burkhart i Strub (3)	8	19	1	7	9	11	15	70
Mønness (2)	14	1	19	12	12	12	6	76
Cañadas <i>et al.</i> III (2)	15	1	16	13	14	13	7	79
Bennet i Clutter (3)	12	14	1	16	15	15	16	89
Curtis (1)	17	8	1	17	17	17	17	94
Cañadas <i>et al.</i> I (2)	16	1	18	15	16	16	13	95
Hui i Gadow (2)	11	22	11	14	13	14	14	99
Cañadas <i>et al.</i> II (2)	20	1	21	18	20	19	18	117
Clutter i Allison (1)	19	18	1	20	19	20	20	117
Cox I (1)	18	21	13	19	18	18	19	126
Castedo <i>et al.</i> mod. (2)	22	16	11	21	21	21	21	133
Gaffrey (2)	21	7	22	22	22	22	22	138

Degut a l'elevat nombre de models analitzats, els resultats obtinguts en la taula de decisió es comenten per grups, segons la classificació realitzada en el capítol de “*Materials i mètodes*”. Aquesta agrupa els models en funció de l'esforç de mostreig que representa l'obtenció de les variables que intervenen en la seva formulació.

Entre els pitjors models es troben els del grup 1 (*Curtis*, *Cox I* i *Clutter i Allison*), els quals requereixen un baix esforç de mostreig per a calcular les seves variables. Es necessita un inventari de diàmetres en els tres models, i també l'edat de la massa per als models de *Curtis* i de *Clutter i Allison*. Aquest resultat concorden amb els obtinguts per LÓPEZ *et al.* (2003) per al *Pinus radiata* a Galícia. A més són els esperats, ja que l'ús de variables independents relacionades només amb el diàmetre o l'edat de la parcel·la no és suficient per explicar la variabilitat observada de l'alçada total.

A l'incloure més variables milloren les estimacions, així els models que pertanyen al grup 2 han donat més bons resultats en l'ajust. Aquests requereixen un inventari de diàmetres i una mostra d'alçades per obtenir les variables explicatives que intervenen en els models.

Els models classificats en el grup 3, que engloben dades de diàmetre, d'alçada i d'edat (*Tomé*, *Burkhart i Strub* i *Pascoa*) han donat resultats similars als del grup 2, encara que no es troben entre els millors. Això indica que la inclusió de l'edat de la parcel·la com a variable explicativa no millora molt la precisió de les estimacions, degut probablement a què hi ha poca variabilitat d'aquesta variable en el mostreig. També pot ser degut a què cap dels models analitzats que inclouen l'edat sigui adequat per a les dades de la mostra. L'obtenció d'aquesta variable, a més, suposa un esforç de mostreig més elevat. Per tant, seguint el principi de parsimònia segons el qual el millor model és el més senzill que permet resoldre l'objectiu plantejat, aquests models no s'han tingut en compte en la fase de validació.

Aquests resultats difereixen dels obtinguts per LÓPEZ *et al.* (2003) on un model del grup 3 (*Tomé*) és el que s'ajusta millor, seguit per models del grup 2 diferents dels que han resultat ser els més adequats en el present estudi.

A partir d'aquest resultat, s'han escollit els 5 models amb una puntuació global dels estadístics més baixa com aquells models més adequats: *Cox II mod. 1*, *Sloboda et al.*, *Cox III*, *Harrison et al.* i *Mirkovich*. Aquests han estat els que s'han validat.

4.1.2 RESULTATS DE LA VALIDACIÓ I SELECCIÓ DEL MODEL ÒPTIM

La validació s'ha realitzat amb la tècnica de la validació creuada per parcel·les. A la **Taula 4.4** es mostren els valors dels estadístics calculats per avaluar la bondat de la validació.

Taula 4.4: Resultats dels estadístics utilitzats per avaluar la bondat de la validació dels models. Arrel de l'error quadràtic mig (*recm*) i criteri Bayesià d'informació (*BIC*).

Model	<i>recm</i>	<i>BIC</i>
Sloboda <i>et al.</i>	1,692	133,757
Cox II mod. 1	1,669	145,521
Cox III	1,729	150,227
Harrison <i>et al.</i>	1,788	150,781
Mirkovich	1,875	165,989

El model de *Sloboda et al.* ha estat el que ha donat més bons resultats i el que s'ha escollit com el més adequat per a les dades de la mostra. Entre tots els models és el que presenta amb diferència un valor del criteri *BIC* més baix. El valor de l'estadístic *recm* d'aquest model no és el més baix, però presenta una diferència poc significativa respecte al model amb el *recm* menor (*Cox II mod. 1*). A més presenta una correlació entre paràmetres molt dèbil, a diferència de *Cox II mod. 1* que té una colinialitat molt elevada ($IC = 90,1$), fet que pot afectar les estimacions dels paràmetres.

Per a mesurar la robustesa del model de *Sloboda et al.*, s'ha comparat el valor de l'estadístic *recm* de validació (1,667) amb el de l'ajust (1,692) observant que són molt similars. Això significa que el model no només s'ajusta bé a les dades de la mostra, sinó que també s'ajustaria a altres mostres procedents de masses regulars de *Pinus sylvestris* a la zona. Per tant, el model és vàlid a l'hora de predir l'alçada total del l'arbre individual en masses regulars de *Pinus sylvestris* al Parc Comarcal del Castell de Montesquiú.

El model de *Sloboda et al.* presenta la següent formulació matemàtica:

$$h = 1.3 + (H_m - 1.3) \cdot e^{\left(b_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{d_g} \right) \right)} \cdot e^{b_1 \cdot \left(\frac{d}{d_g} - 1 \right)} \quad [3.23]$$

On:

h : alçada total (m),

H_m : alçada mitja de la parcel·la (m),

d : diàmetre normal amb escorça (cm),

d_g : diàmetre mig quadràtic, amb escorça, de la parcel·la (cm) i

b_i : paràmetres a estimats en l'ajust ($b_0 = -0,299$ i $b_1 = 0,003$).

El paràmetre b_1 no és significatiu, a més al tenir un valor pròxim a 0: $\lim_{b_1 \rightarrow 0} e^{b_1 \left(\frac{d}{d_g} - \frac{1}{d} \right)} = 1$, per tant l'expressió matemàtica del model quedaria de la següent manera:

$$h \approx 1.3 + (H_m - 1.3) e^{\left(b_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{d_g} \right) \right)} \quad [4.1]$$

El model, que es pot anomenar *Sloboda et al. modificat*, s'ha tornat a ajustar per a la nova expressió matemàtica [4.1]. Si comparem els resultats dels estadístics amb els del model de *Sloboda et al.* (veure la **Taula 4.5**), s'observa que els dos criteris de selecció (*AIC* i *BIC*) han donat més bons resultats, al tractar-se d'una model més parsimoniós. Pel que fa a la resta d'estadístics, han donat resultats pràcticament similars.

El model de *Sloboda et al. modificat* també s'ha validat. Els resultats dels estadístics es poden observar a la **Taula 4.6** on també es poden comparar amb els estadístics de validació del model original de *Sloboda et al.* Es tracta també d'un model robust, ja que si comparem el valor del *recm* de l'ajust (1,660) amb el de la validació (1,682) són pràcticament similars.

Taula 4.5: Comparació dels resultats dels estadístics d'ajust entre el model de *Sloboda et al.* i el model de *Sloboda et al. modificat*.

Model	R^2	IC	s	<i>eam</i>	<i>recm</i>	<i>AIC</i>	<i>BIC</i>
Sloboda et al.	0,6602	1,5	-0,014	1,323	1,667	124,61	130,18
Sloboda et al. modificat	0,6600	-	0,029	1,323	1,660	122,69	125,48

Taula 4.6: Comparació dels resultats dels estadístics de validació entre el model de *Sloboda et al.* i el model de *Sloboda et al. modificat*.

Model	<i>recm</i>	<i>BIC</i>
<i>Sloboda et al.</i>	1,692	133,75
<i>Sloboda et al. modificat</i>	1,682	128,59

La distribució dels residus de l'ajust no segueix una tendència definida. Per tant, no es produiran errors sistemàtics a l'hora d'estimar l'alçada total (veure **Fig. 1.4**). Es tracta, doncs, d'un model adequat. A partir de l'estructura dels residus també s'intueix que es compleixen les hipòtesis d'heterocedasticitat i de independència de residus.

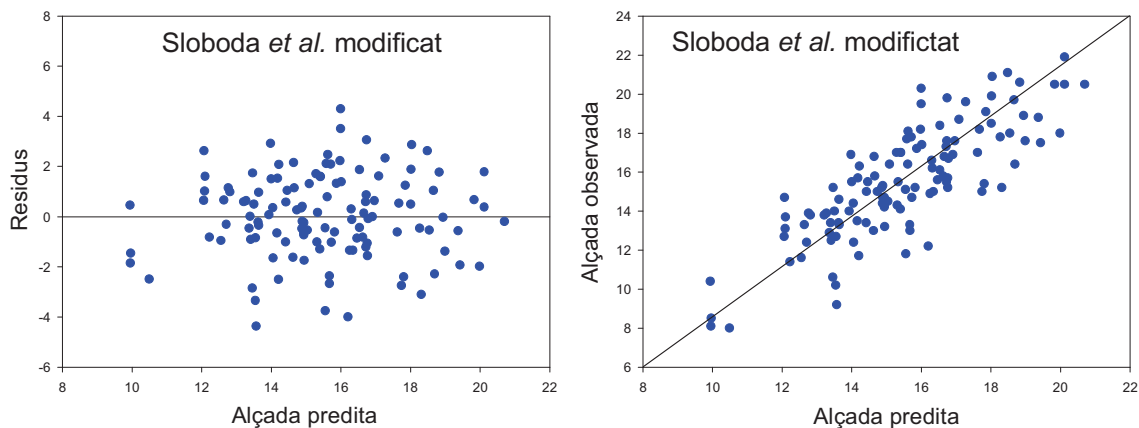


Fig. 4.1: Gràfic de residus i gràfic d'alçada predita vs alçada observada ($R^2=0,6600$) per al model de *Sloboda et al. modificat*.

La hipòtesi de normalitat s'ha comprovat amb la prova de Kolmogorv-Smirnoff aplicada als residus. El resultat del test ha estat: $D=0.0392$ i $p>0.15$; essent D el valor de l'estadístic de contrast i p el risc de rebuig de la hipòtesi nul·la de la normalitat. Al obtenir una probabilitat associada a l'estadístic molt superior a 0,05, no es pot rebutjar la hipòtesi nul·la i, per tant, s'admet que es compleix la hipòtesi de normalitat.

El valor del paràmetre obtingut en l'ajust per al model de *Sloboda et al. modificat* és $b_0 = -0,303$, per tant l'expressió matemàtica que ens permet estimar l'alçada total de l'arbre individual és:

$$h = 1.3 + (H_m - 1.3) \cdot e^{\left(-0,303 \cdot \left(1 - \frac{d}{d_g}\right)\right)} \quad [4.2]$$

Es tracta d'un model on únicament intervé un paràmetre, amb una estructura matemàtica simple i manejable que permet resoldre l'objectiu plantejat. El model pertany al grup 2, és a dir, l'esforç de mostreig a realitzar per obtenir les variables explicatives és intermig. A partir d'un inventari realitzat amb relascopi es poden obtenir fàcilment les variables d i d_g , mentre que H_m es pot estimar a partir d'una mostra d'alçades. El model de *Sloboda et al. modificat* podria oferir un bon balanç entre la precisió del model i l'esforç de mostreig.

Els resultats obtinguts en aquest estudi difereixen dels aconseguits per LÓPEZ *et al.* (2003) per a *Pinus radiata* a Galícia en què el model de *Sloboda et al.* no presenta molts bons resultats i el millor model ha estat el de *Cox II Mod.2*, que en el present estudi no s'ha ajustat als valors de la mostra. Les diferències de resultats entre els dos estudis podrien ser degudes a què es tracta d'espècies i zones diferents i també a què probablement s'hagi treballat amb rangs d'edat diferents. Tots dos models presenten les variables explicatives H_m , d i d_g en la seva formulació matemàtica.

4.2 RESULTATS I DISCUSSIÓ DE MODELS DE CREIXEMENT EN DIÀMETRE

4.2.1 RESULTATS DE L'AJUST

A partir del procediment *Stepwise* de selecció de variables, s'han formulat dos models lineals per cada índex de competència considerat, un per cada variable dependent a analitzar: *CRM5* i *CSM5*. També se n'han definit dos sense incloure cap índex de competència, a efectes comparatius. Això equival a un total de 14 models. Un cop definida l'estructura dels models, s'han estimat els valors dels paràmetres a través del procediment MODEL i s'han obtingut les equacions d'ajust.

L'anàlisi dels gràfics de residus en funció dels valors predits (veure **Annex 7.3.2** i **Annex 7.3.3**), evidencia la manca d'una estructura definida, per tant ens informa que es compleix la hipòtesi de linealitat en tots els models. Això indica que els estimadors dels paràmetres són centrats. En canvi, el supòsit d'homocedasticitat no es compleix. Els gràfics presenten forma d'embut en tots els models, és a dir, la variabilitat dels residus augmenta amb la magnitud de les prediccions. La falta d'homocedasticitat comporta que els estimadors dels paràmetres no siguin eficients, és a dir, presentin una variància molt elevada.

Per solucionar la manca d'homocedasticitat s'ha aplicat una transformació logarítmica de la variable dependent, de manera que s'ha treballat amb $\ln(CRM5)$ i $\ln(CSM5)$. Els models s'han tornat a ajustar per a aquestes noves variables.

L'anàlisi dels gràfics de residus dels models amb les variables dependents transformades, informen que es compleixen tant la hipòtesi de linealitat com la d'homocedasticitat en tots ells (veure **Annex 7.3.4** i **Annex 7.3.5**).

La formulació matemàtica dels models, obtinguda a partir de l'estratègia *Stepwise* de selecció de variables i el posterior ajust, es presenta en la **Taula 4.7**. La **Taula 4.8** mostra el valor dels estadístics d'ajust, utilitzats per avaluar la bondat d'ajust dels models. Els models s'han anomenat en funció de la variable dependent i l'índex de competència considerat.

Taula 4.7: Expressió matemàtica dels models de creixement en diàmetre. Els models s'han anomenat en funció de la variable dependent i l'índex de competència considerat.

Model	Expressió matemàtica
$Ln(CSM5)-N$	$Ln(CSM5) = 3,70099 - 0,00045 \cdot N - 0,01988 \cdot E + 0,09734 \cdot d + 0,05291 \cdot h - 0,08373 \cdot d_g$
$Ln(CRM5)-G$	$Ln(CRM5) = 1,73274 - 0,013 \cdot G - 0,01852 \cdot E + 0,05532 \cdot d$
$Ln(CSM5)-G$	$Ln(CSM5) = 2,39513 - 0,01213 \cdot G - 0,01664 \cdot E + 0,104 \cdot d$
$Ln(CRM5)-BAL$	$Ln(CRM5) = 1,74803 - 0,02252 \cdot BAL - 0,01878 \cdot E + 0,08124 \cdot h$
$Ln(CSM5)-BAL$	$Ln(CSM5) = 2,25767 - 0,01727 \cdot BAL - 0,0173 \cdot E + 0,0656 \cdot d + 0,06196 \cdot h$
$Ln(CRM5)-BALMOD$	$Ln(CRM5) = 2,07366 - 0,18868 \cdot BALMOD - 0,01715 \cdot E + 0,06079 \cdot h$
$Ln(CSM5)-BALMOD$	$Ln(CSM5) = 2,58892 - 0,16279 \cdot BALMOD - 0,01578 \cdot E + 0,05727 \cdot d + 0,05604 \cdot h$
$Ln(CRM5)$	$Ln(CRM5) = 1,27587 - 0,01902 \cdot E + 0,05199 \cdot d$
$Ln(CSM5)$	$Ln(CSM5) = 1,96914 - 0,01711 \cdot E + 0,10089 \cdot d$

Taula 4.8: Resultats dels estadístics d'ajust utilitzats per avaluar la bondat d'ajust dels models. Coeficient de determinació (R^2), índex de condició (IC), error absolut mig (eam), arrel de l'error quadràtic mig ($recm$), criteri d'informació d'Akaike (AIC) i criteri Bayesià d'informació (BIC).

Model	R^2	IC	eam	$recm$	AIC	BIC
$Ln(CSM5)-N$	0,6188	47,1	0,429	0,540	-140,61	-123,94
$Ln(CRM5)-G$	0,3617	14,1	0,451	0,560	-133,93	-122,82
$Ln(CSM5)-G$	0,5974	14,1	0,446	0,551	-138,13	-127,02
$Ln(CRM5)-BAL$	0,3919	15,9	0,441	0,547	-139,71	-128,59
$Ln(CSM5)-BAL$	0,6227	21,4	0,433	0,535	-143,85	-129,95
$Ln(CRM5)-BALMOD$	0,3915	17,2	0,445	0,547	-139,63	-128,52
$Ln(CSM5)-BALMOD$	0,6215	22,3	0,435	0,536	-143,46	-129,57
$Ln(CRM5)$	0,3358	8,7	0,457	0,569	-131,21	-122,87
$Ln(CSM5)$	0,5828	8,7	0,452	0,558	-135,87	-127,53

En tots els casos, el contrast global de regressió ha donat un nivell crític del test F inferior a 0,0001. Això indica que en el model existeix almenys una variable independent que explica la variació de la variable dependent. Aquests resultats són lògics, ja que el procediment *Stepwise* només inclou en el model aquelles variables que són significatives.

Els índex de competència, però, han estat variables que s'han obligat a incloure. Per aquesta raó, en alguns casos, han resultat ser no significatives (amb un nivell de significació $< 0,05$). És el cas del model amb l'índex de competència N i variable dependent $Ln(CRM5)$ i dels models amb els índexs S i SDI per a totes dues variables dependents: $Ln(CRM5)$ i $Ln(CSM5)$. Per a la resta models, totes les variables han estat significatives, incloses les que corresponen als índex de competència.

La capacitat predictiva del model mesurada a partir del coeficient de determinació (R^2) presenta valors entre el 33 i el 39 % per als models amb la variable resposta $Ln(CRM5)$. En els models on aquesta variable s'ha transformat en valors de creixement en secció $Ln(CSM5)$, la capacitat predictiva augmenta situant-se entre el 58 i el 62 %. Per a totes dues variables resposta, els models amb un menor R^2 són els que no inclouen cap índex de competència en la seva formulació.

Els models presenten una colinearitat dèbil, ja que l'índex de condició (IC) és menor de 30 en tots ells, a excepció del model $Ln(CSM5)-N$ on l'elevada colinialitat ($IC= 47,1$) podria afectar les estimacions dels paràmetres (PEÑA, 1989).

Els estadístics anteriors (R^2 i IC) amb la resta d'estadístics calculats, s'han utilitzat conjuntament per valorar els models i la seva adequació a les dades de la mostra. La taula de decisió construïda amb aquesta finalitat presenta els següents resultats (veure **Taula 4.9**):

Taula 4.9: Taula de decisió utilitzada per a seleccionar els models més adequats. Coeficient de determinació (R^2), índex de condició (IC), error absolut mig (eam), arrel de l'error quadràtic mig ($recm$), criteri d'informació d'Akaike (AIC) i criteri Bayesià d'informació (BIC).

Model	R^2	IC	eam	$recm$	AIC	BIC	Puntuació global
$Ln(CSM5)-BAL$	1	7	2	1	1	1	13
$Ln(CSM5)-BALMOD$	2	8	3	2	2	2	19
$Ln(CRM5)-BAL$	6	5	4	4	4	3	26
$Ln(CSM5)-N$	3	9	1	3	3	7	26
$Ln(CRM5)-BALMOD$	7	6	5	4	5	4	31
$Ln(CSM5)-G$	4	3	6	6	6	6	31
$Ln(CSM5)$	5	1	8	7	7	5	33
$Ln(CRM5)-G$	8	3	7	8	8	9	43
$Ln(CRM5)$	9	1	9	9	9	8	45

Els models amb els índex de competència *BAL* i *BALMOD* són els més adequats i dins d'aquests, els que presenten com a variable dependent el creixement en secció ja que són més explicatius. Ambdós són índex de competència a nivell d'arbre independents de la distància.

Els models amb l'Àrea Basal (*G*) o sense índex de competència es comporten pitjor, mentre que el model que inclou la Densitat (*N*) ha donat un resultat intermig en la valoració global. Aquest, però, al tenir una colinealitat elevada no s'ha tingut en compte a l'hora de fer la validació.

Aquests resultats difereixen completament dels obtinguts per ROMÀ (2002) per a masses regulars de pinassa al Solsonès. En el seu estudi ROMÀ conclou que els índex que es comporten millor són els referits a nivell de massa, mentre que els de pitjor comportament són els índex a nivell d'arbre (*BAL* i *BALMOD*).

A banda dels índex de competència, la resta de variables que han resultat significatives i que contribueixen a explicar el creixement han estat: l'edat de l'arbre (*E*), el diàmetre (*d*), l'alçada (*h*) i, només en el cas del model *Ln(CSM5)-N*, també el diàmetre mig quadràtic (*d_g*).

El *d* és un bon estimador de la competència que ha patit un arbre fins al moment (MONTSERUD I STERBA, 1996). Les diferències de diàmetre entre individus d'una massa regular reflecteixen les diferències en la competència, que es tradueixen en variacions del creixement. Si s'utilitzen valors mitjos de la massa (*d_g* o *D_m*) la informació referent a aquestes diferències entre els arbres es perd. Per això el *d* a nivell d'arbre és més explicatiu que a nivell de massa.

La *h* també ha resultat una variable significativa, a diferència de la *H₀* i *H_m*. La mostra que s'ha analitzat, està formada per arbres dominants, dominats i de diàmetre mig quadràtic. La variable *h* representa cadascun d'aquests estrats socials, els quals tenen un creixement diametral diferent. En canvi, les variables *H₀* i *H_m* estan referides a nivell de massa i no es relacionen amb la posició que ocupa l'arbre dins el dosser arbori.

L'edat de l'arbre individual (*E*) ha estat més significativa per explicar el creixement que l'edat de la massa (*t*). Tot i que es tracta d'una massa regular i per tant els arbres d'una

mateixa parcel·la han de tenir com a màxim 20 anys de diferència, aquesta pot ser suficient per influir sobre la variable a explicar. Si ho traduïm en valors mitjos de massa, el rang de valors que agafa la variable pot ser insuficient per explicar variacions en el creixement.

A partir d'aquests resultats s'han escollit els 3 models amb una puntuació global dels estadístics més baixa com aquells més adequats: $Ln(CSM5)-BAL$, $Ln(CSM5)-BALMOD$ i $Ln(CRM5)-BAL$. Aquests són els que han passat a la fase de validació.

4.2.2 RESULTATS DE LA VALIDACIÓ I SELECCIÓ DEL MODEL ÒPTIM

En aquest cas també s'ha realitzat una validació utilitzant la tècnica de la validació creuada per parcel·les al tenir variables amb dades repetides i correlacionades dins una mateixa parcel·la. Els resultats dels estadístics utilitzat per avaluar la bondat de validació es mostren a la **Taula 4.10**.

Taula 4.10: Resultats dels estadístics utilitzats per avaluar la bondat de la validació dels models. Arrel de l'error quadràtic mig (*recm*) i criteri Bayesià d'informació (*BIC*).

Model	<i>recm</i>	<i>BIC</i>
$Ln(CSM5)-BAL$	0,554	-121,673
$Ln(CSM5)-BALMOD$	0,557	-120,605
$Ln(CRM5)-BAL$	0,561	-122,721

Els models tenen uns valors dels estadístics força igualats. El model $Ln(CRM5)-BAL$ que presenta el millor comportament per a l'estadístic *BIC* és a la vegada el que té pitjors resultats per al *recm*. Per poder decidir de manera objectiva quin és el model més adequat s'ha tornat a construir una taula de decisió (veure **Taula 4.11**).

Taula 4.11: Taula de decisió per a seleccionar el model més adequat.

Model	<i>recm</i>	<i>BIC</i>	Puntuació global
$Ln(CSM5)-BAL$	1	2	3
$Ln(CRM5)-BAL$	3	1	4
$Ln(CSM5)-BALMOD$	2	3	5

El millor model valorant conjuntament els dos estadístic ha estat $\ln(CSM5)-BAL$. Per a mesurar la seva robustesa s'ha comparat el valor de l'estadístic *recm* de validació (0,554) amb el de l'ajust (0,535). Els dos valors són similars, de manera que la robustesa és pròxima a 1. El model, doncs, és extrapolable a altres mostres que es puguin realitzar a la zona i, per tant, és vàlid a l'hora d'estimar el creixement de masses regulars de *Pinus sylvestris* al Parc Comarcal del Castell de Montesquiú.

L'anàlisi gràfic dels residus permet comprovar les hipòtesis de linealitat, homocedasticitat i independència de residus. Tal com es pot observar a la **Fig. 4.2** no s'aprecia cap tendència en la distribució dels residus que faci pensar en manca de linealitat o d'independència. La variància dels residus també és homogènia al llarg dels valors predits pel model amb el que cal suposar que es tracta d'un model homocedàstic.

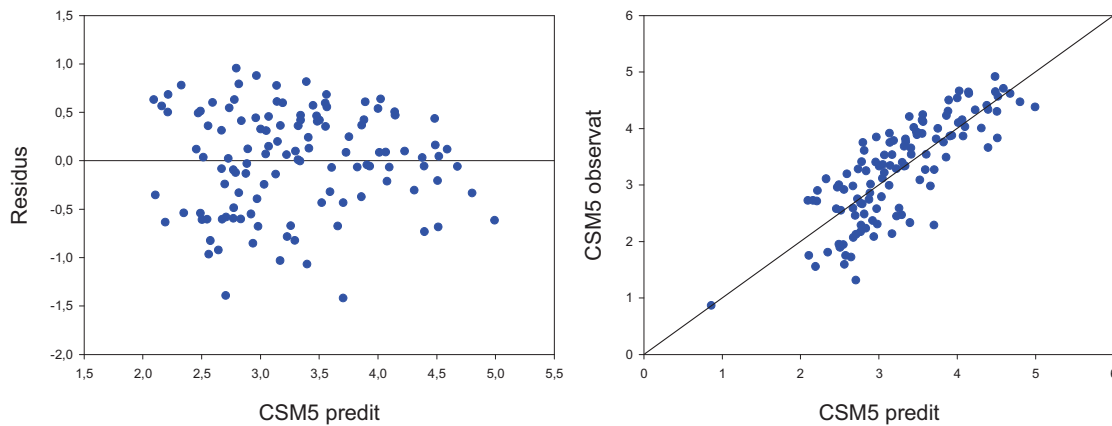


Fig. 4.2: Gràfic de residus i gràfic de $CSM5$ predit vs $CSM5$ observat ($R^2=0,6227$) per al model $\ln(CSM5) = 2,25767 - 0,01727 \cdot BAL - 0,0173 \cdot E + 0,0656 \cdot d + 0,06196 \cdot h$

El resultat test de Kolmogorov-Smirnov ha estat: $D=0.0557$ i $p>0.15$; essent D el valor de l'estadístic de contrast i p el risc de rebuig de la hipòtesi nul·la de la normalitat. Al obtenir una probabilitat associada a l'estadístic molt superior a 0,05, no es pot rebutjar la hipòtesi nul·la, per tant s'admet que es compleix la hipòtesi de normalitat.

El model seleccionat presenta la següent formulació matemàtica:

$$\ln(CSM5) = 2,25767 - 0,01727 \cdot BAL - 0,0173 \cdot E + 0,0656 \cdot d + 0,06196 \cdot h \quad [4.3]$$

Com ja s'ha comentat en el capítol de “*Materials i mètodes*”, la variable *CSM5* es refereix al creixement que s'ha produït en un període de 5 anys. Per obtenir el creixement anual mig, s'ha de dividir l'expressió [4.3] per 5. L'equació del model, destransformant la variable dependent, és la següent:

$$CSM5 = \exp(2,25767 - 0,01727 \cdot BAL - 0,0173 \cdot E + 0,0656 \cdot d + 0,06196 \cdot h) / 5 \quad [4.4]$$

On:

CSM5: creixement en secció mig dels últims 5 anys.

BAL: índex de *BAL* (m²/ha)

$$BAL_{ij} = \sum_{n=1}^t \frac{\pi D_n^2}{4}$$

On: *BAL_{ij}*: valor del *BAL* en la parcel·la *i* per a l'arbre *j*.

D_n: diàmetre normal de l'arbre *n*. Sempre s'ha de complir que *D_n* > *D_j*

E: edat de l'arbre (anys),

d: diàmetre normal amb escorça (cm),

h: alçada total (m),

5. CONCLUSIONS

Les conclusions obtingudes sobre els models de predicció de l'alçada total de l'arbre són les següents:

- La funció alçada-diàmetre generalitzada més adequada per estimar l'alçada total individual del pi roig al Parc Comarcal del Castell de Montesquiú és la següent ($R^2=0,6600$):

$$\text{Sloboda et al. modificat:} \quad h = 1.3 + (H_m - 1.3) \cdot e^{\left(-0,303 \cdot \left(1 - \frac{d}{d_g}\right)\right)}$$

- Amb només variables diametral i d'edat els models presenten una capacitat predictiva baixa que millora al incloure dades sobre l'alçada.
- Els models que han donat més bons resultats són els que inclouen variables relacionades amb el diàmetre i l'alçada.
- La inclusió de l'edat de la parcel·la com a variable explicativa no millora molt la precisió de les estimacions.

Pel que fa als models de creixement en diàmetre s'ha arribat a les següents conclusions:

- S'ha desenvolupat el següent model per al creixement diametral del pi roig al Parc Comarcal del Castell de Montesquiú ($R^2=0,6227$):

$$CSM5 = \exp(2,25767 - 0,01727 \cdot BAL - 0,0173 \cdot E + 0,0656 \cdot d + 0,06196 \cdot h) / 5$$

- Els models de creixement en secció són més explicatius que els models de creixement radial.
- Les variables que han resultat significatives com a predictores del creixement han estat l'edat de l'arbre, el diàmetre i l'alçada.
- Els models amb índexs de competència en la seva formulació són més explicatius que aquells que no inclouen cap índex de competència.
- Els índex de competència que s'han comportat millor han estat el *BAL* i el *BALMOD*, ambdós són índex de competència a nivell d'arbre independents de la distància.

6. BIBLIOGRAFIA

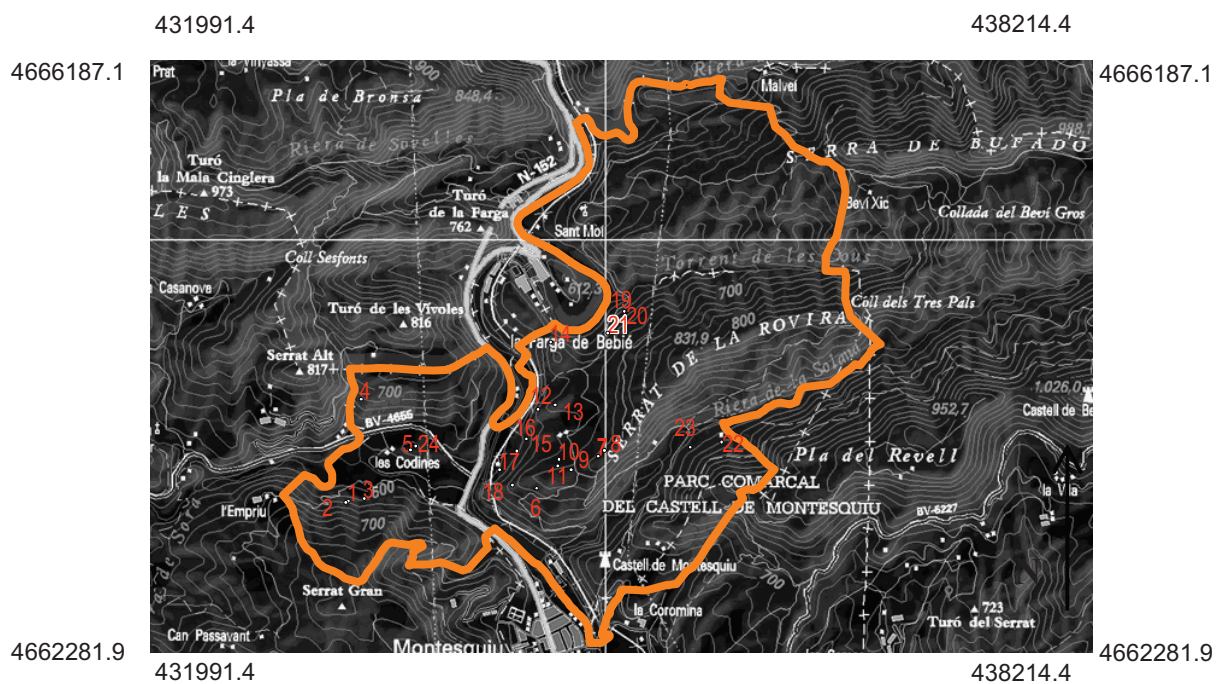
- ALEMANY, S. (1994) *Guia pràctica de Silvicultura*. Barcelona: Centre de la Propietat Forestal
- ALLUÉ, J. L. (1990) *Atlas fitoclimático de España. Taxonomias*. Monografías INIA, 69. Madrid: MAPA-INIA.
- ÁLVAREZ, M. F. (1998) *Influencia de la competencia en el crecimiento en sección en Pinus radiata D. Don*. Proyecto fin de carrera. EPS. Lugo. Universidad de Santiago de Compostela.
- ANUARIO DE ESTADÍSTICA AGRARIA (1990) MAPA. Madrid: Secretaría General Técnica.
- AUNÓS, A. i RODRÍGUEZ, F. (2002) *Precisión y rendimientos comparativos de dos tipos de hipsómetros en la medición de alturas en choperas*. Montes: Revista de Ámbito Forestal. 68: 21-24.
- BIGING, G. S. i DOBBERTIN, M. (1992) *A comparison of distance-dependent competition models for height and basal area growth of individual conifer trees*. For. Sci. 38 (3): 695-720.
- BIGING, G. S. i DOBBERTIN, M. (1995) *Evaluation of competition indices in individual tree growth models*. For. Sci. 41 (2): 360-377.
- BRAVO, F. i LIZARRALDE, I. (2004) *Modelo de dinámica de rodales forestales para las masas naturales de pino silvestre en Castilla y León. Protocolo para la obtención de datos*. Document intern. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid. Palencia.
- BRAVO, J.; MONTERO, G. i DEL RÍO, M. (1997) *Índices de densidad de las masas forestales*. Ecología. 11: 177-187.
- CASTEDO, F. (2003) *Modelo dinámico de crecimiento para las masas de Pinus radiata D. Don en Galicia. Simulación de alternativas selvícolas con inclusión del riesgo de incendio*. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- CASTROVIEJO, S. et al. [ed] (1986) *Flora ibérica: plantas vasculares de la Península Ibérica e Islas Baleares*. Vol. I. Madrid: Real Jardín Botánico. CSIC.
- CATALAN, G. et al. [ed] (1991) *Las Regiones de procedencia de Pinus sylvestris L. y Pinus nigra Arn. subsp. salzmannii en España*. Madrid: ICONA.
- CENTRE DE LA PROPIETAT FORESTAL (1995) *Apunts de silvicultura*. Núm. 4. Barcelona: Centre de la Propietat Forestal.
- COOK, E. R. (1987) *The decomposition of tree – ring series for enviromental studies*. Tree- Ring Bulletin. 47:37 – 59.
- CREAF (2000) *Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya*. Bellaterra: Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals.

- DE BOLÓS, O. i VIGO, J. (1984) *Flora dels Països Catalans*. Vol. I. Barcelona: Barcino.
- DEL RÍO, M. i MONTERO, G. (2001) *Modelo de simulación de claras en masas de Pinus sylvestris L.* Monografías INIA Forestal núm. 3. Madrid.
- DIPUTACIÓ DE BARCELONA. XARA DE PARCS NATURALS (2002) *Memòria dels Parc del Castell de Montesquiú. Any 2002*. [Consultat: octubre 2004] Disponible a Internet: www.diba.es/parcs/montesquiú/MemoriaMontesquiú2002.pdf
- GADOW, K.V. (2001) *Waldwachstum. Beilage zur Vorlesung für das Sommersemester*. Universität Göttingen.
- GARCIA, J.L. i TELLA, G. (1986) *Tablas de producción de densidad variable para Pinus sylvestris L. en el sistema pirenaico*. Madrid: INIA.
- GÓMEZ, J.A. i MONTERO, G. (1989) *Efectos de las claras sobre masas naturales de Pinus sylvestris L. en la vertiente sur del macizo de Urbión*. Madrid: INIA.
- GONZÁLEZ VÁZQUEZ, E. (1926) *Regeneración de los montes de especies de luz*. Revista de Montes. 50: 297-357.
- GRÀCIA, C.A. (1993) *Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya: Solsonès*. Vol. 35. Barcelona: CREAF - DARP.
- JÜRGENS, J. (2000) *Pla Tècnic de Gestió i Millora Forestal del Parc Comarcal del Castell de Montesquiú* (Inèdit)
- LEE, D. T. i GADOW, K. V. (1997) *Iterative bestimmung der konkurrenzbäume in Pinus densiflora Beständen*. AFJZ. 168 (3/4): 41-44.
- LIZARRALDE, I.; RODRIGUEZ, F. i BRAVO, F. (2005) *Estimación de los errores cometidos en la medición de alturas mediante vertex® en masas naturales de Pinus sylvestris L. y Pinus pinaster Ait. de los sistemas Central e Ibérico meridional*. Póster en Mesa 5, del IV Congreso Forestal Español. Zaragoza.
- LÓPEZ, C.A.; GORGOSO, J.; CASTEDO, F.; ROJO, A.; RODRÍGUEZ, R.; ÁLVAREZ, J.G. i SÁNCHEZ, F. (2003) *A height-diameter model for Pinus radiata D. Don in Galicia (Northwest Spain)*. Ann. For. Sci. 60, 237-245.
- MADRIGAL, A.; ÁLVAREZ, J.G.; RODRÍGUEZ, R. i ROJO, A. (1999) *Tablas de producción para los montes españoles*. Madrid: Fundación Conde del Valle de Salazar.
- MONSERUD, R. A. i STERBA, H. (1996) *A basal area increment model for individual trees growing in even- and uneven- aged forest stands in Austria*. **For. Ecol. Manage.** **80**: 57-80.
- PARDÉ, J. i BOUCHON, J. (1994) *Dasometría*. Madrid: Paraningo
- PARÉS, E. (1998) *Vocabulari forestal*. 2a edició. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans.

- PEÑA, D. (1989) *Estadística. Modelos y métodos*. Madrid: Alianza
- RATKOWSKY, D. A. (1990) *Handbook of nonlinear regression models*, Marcel Dekker, Inc. New York, New York.
- RODRÍGUEZ, F. (2005) *Modelos de producción de las choperas del valle del Cinca*. A. Aunós (director) Tesis Doctoral. Universitat de Lleida. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària.
- RODRÍGUEZ, F. (1999) *Modelos de crecimiento y de calidad de la madera de Pino Radiata*". M. Broto (director) Proyecto Final de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid
- ROJO, A. i MONTERO, G. (1996) *El pino silvestre en la Sierra de Guadarrama*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- ROLLAND, C.; MICHALET, R.; DESPLANQUE, C.; PETETIN, A. i AIMÉ, S. (1999) *Ecological requirements of Abies alba in the French Alps derived from dentro-ecological analysis*. Journal of Vegetation Science. 10: 297-306.
- ROMÀ, J. (2002) *Modelització del creixement de la pinassa (Pinus nigra ssp. salzmannii) en masses regulars del Solsonès (Catalunya)*. R. Blanco i A. Aunós (co-tutors). Projecte Final de carrera. Universitat de Lleida. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària.
- RUIZ DE LA TORRE, J. (1984) *Árboles y arbustos de España*. Barcelona: Salvat.
- SAS INSTITUTE INC (2001) *SAS/ETS User's Guide*. Versió 8.0. USA: SAS Publising
- SAS INSTITUTE INC (2001) *SAS/STAT User's Guide*. Versió 8.0. USA: SAS Publising
- SAS INSTITUTE INC (2005) *Entrepise Guide*. Versió 9.0. USA: SAS Publising
- SCHRÖDER, J. i GADOW, K. V. (1998) *Testing the performance of the BAL- Index on Maritime Pine in Northwest Spain*. Scandinavian Journal of Forest Research (a impreta)
- STERBA, H. (2001) *Apuntes de modelización forestal*. Jornades impartides a la ETSIM (Madrid)
- WYRKOFF, W.R.; CROOKSTON, N.L. i SATAGE, A.R. (1982) *User's guide to the stand PROGNOSIS model*. U.S. For Serv., Gen. Techn. Rep. INT - 133.122 PP
- VANCLAY, J.K. (1994) *Modelling forest growth and yield. Applications to Mixed Tropical Forest*. CABI Publishing, Wallingford, UK.

7. ANNEXES

7.1 LOCALITZACIÓ DE LES PARCEL·LES



[illegible]

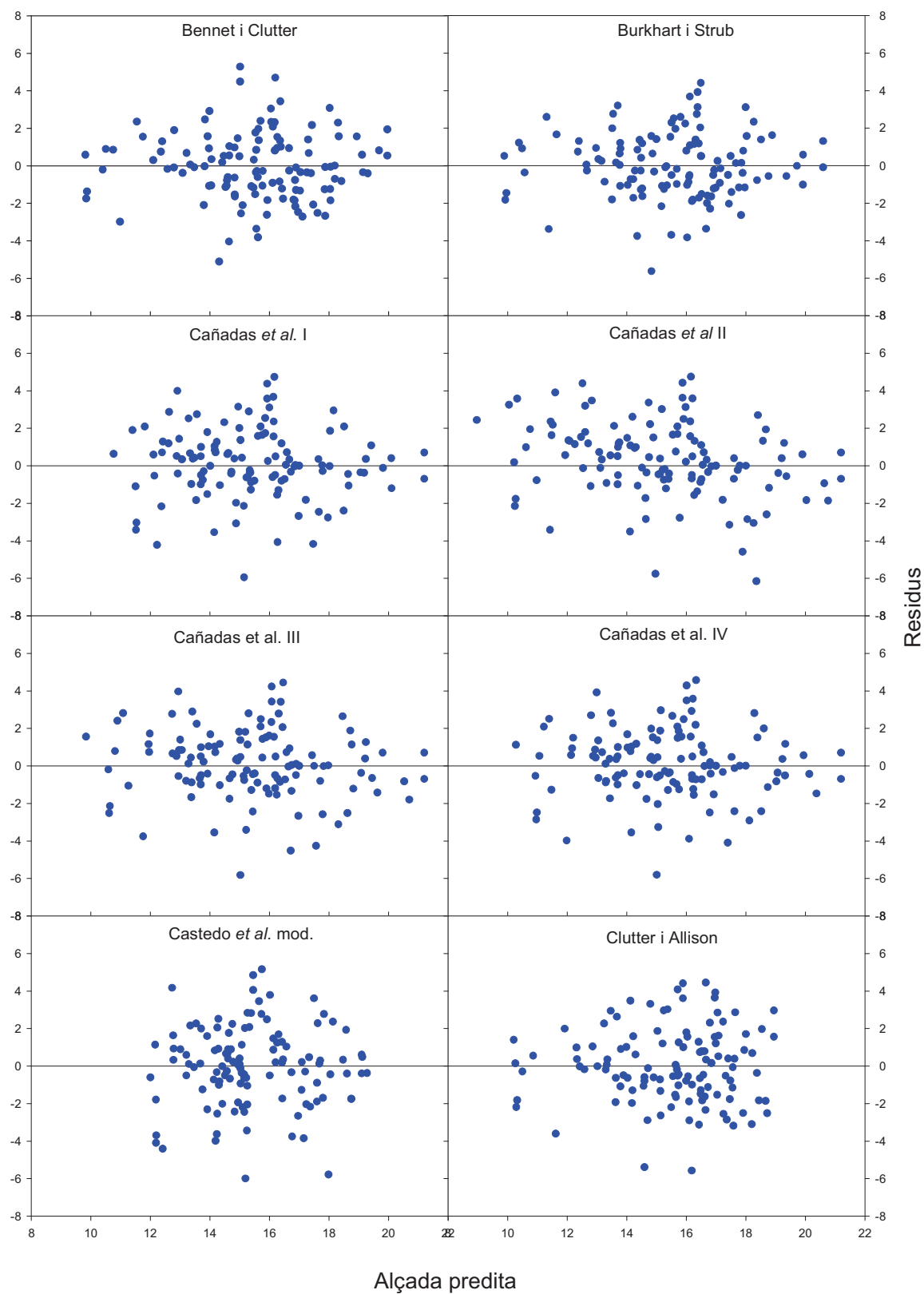
7.2.2 FITXA DE CARACTERITZACIÓ DASOMÈTRICA

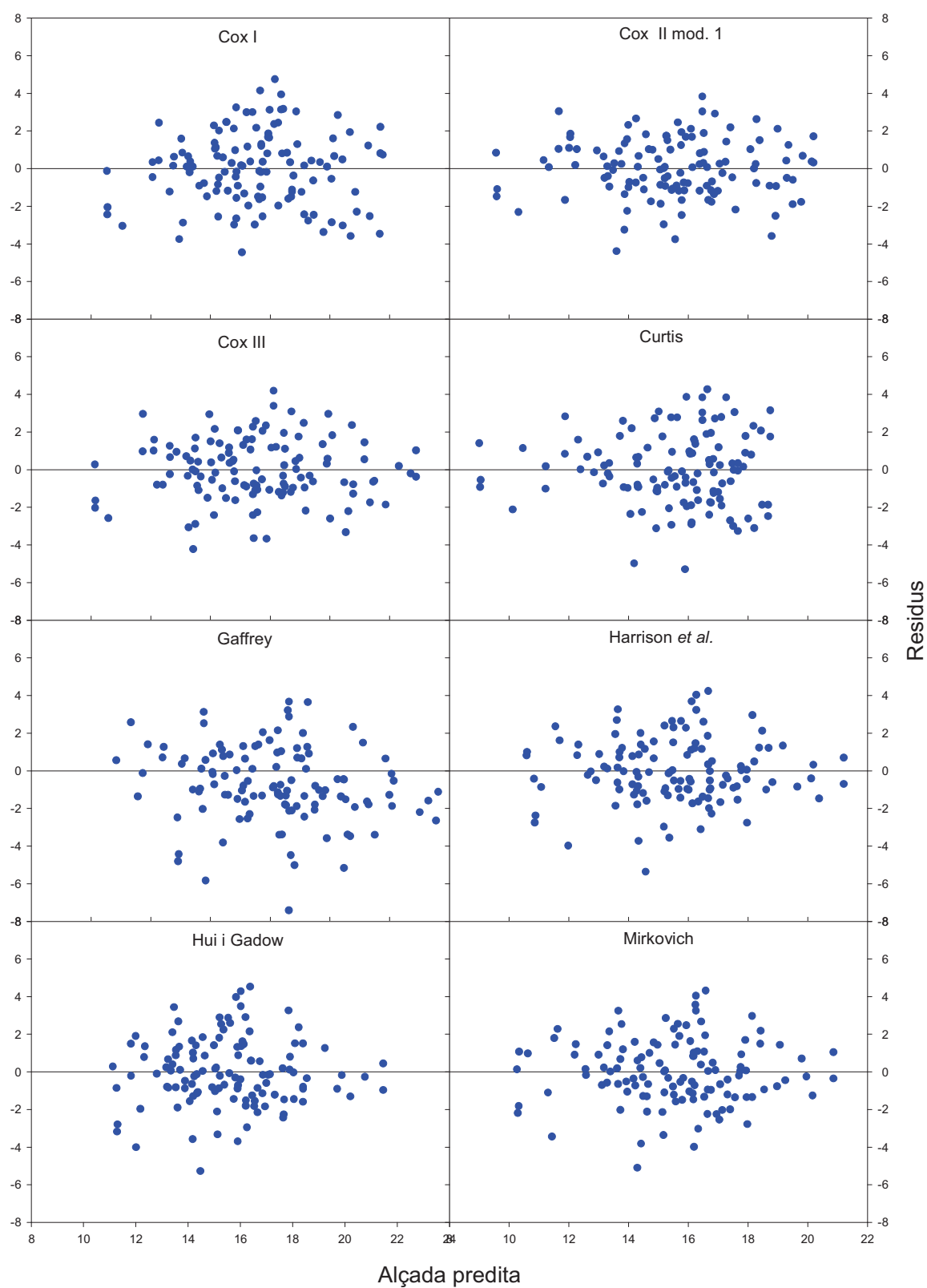
[illegible]

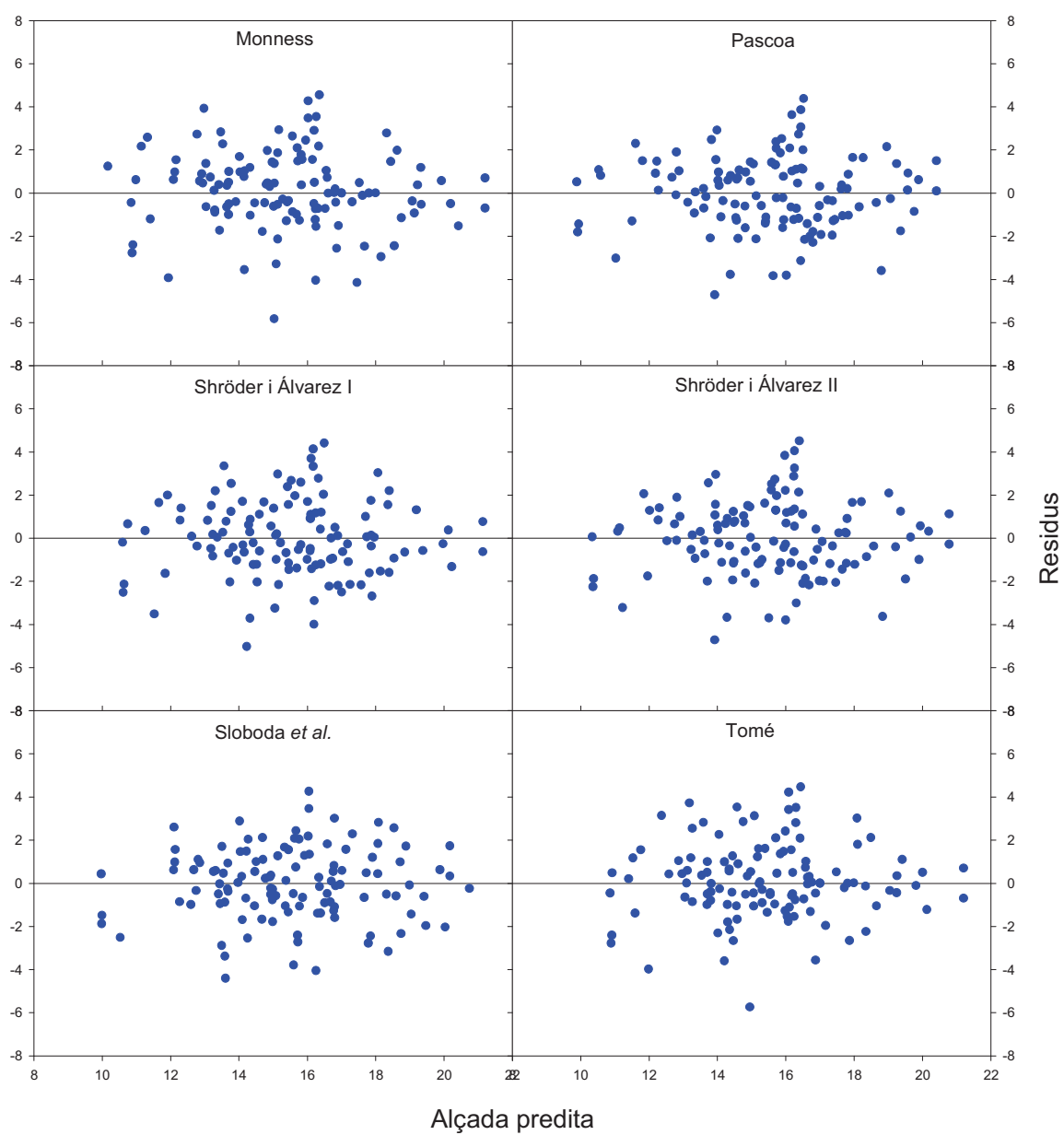
[illegible]

7.3 GRÀFICS DE RESIDUS

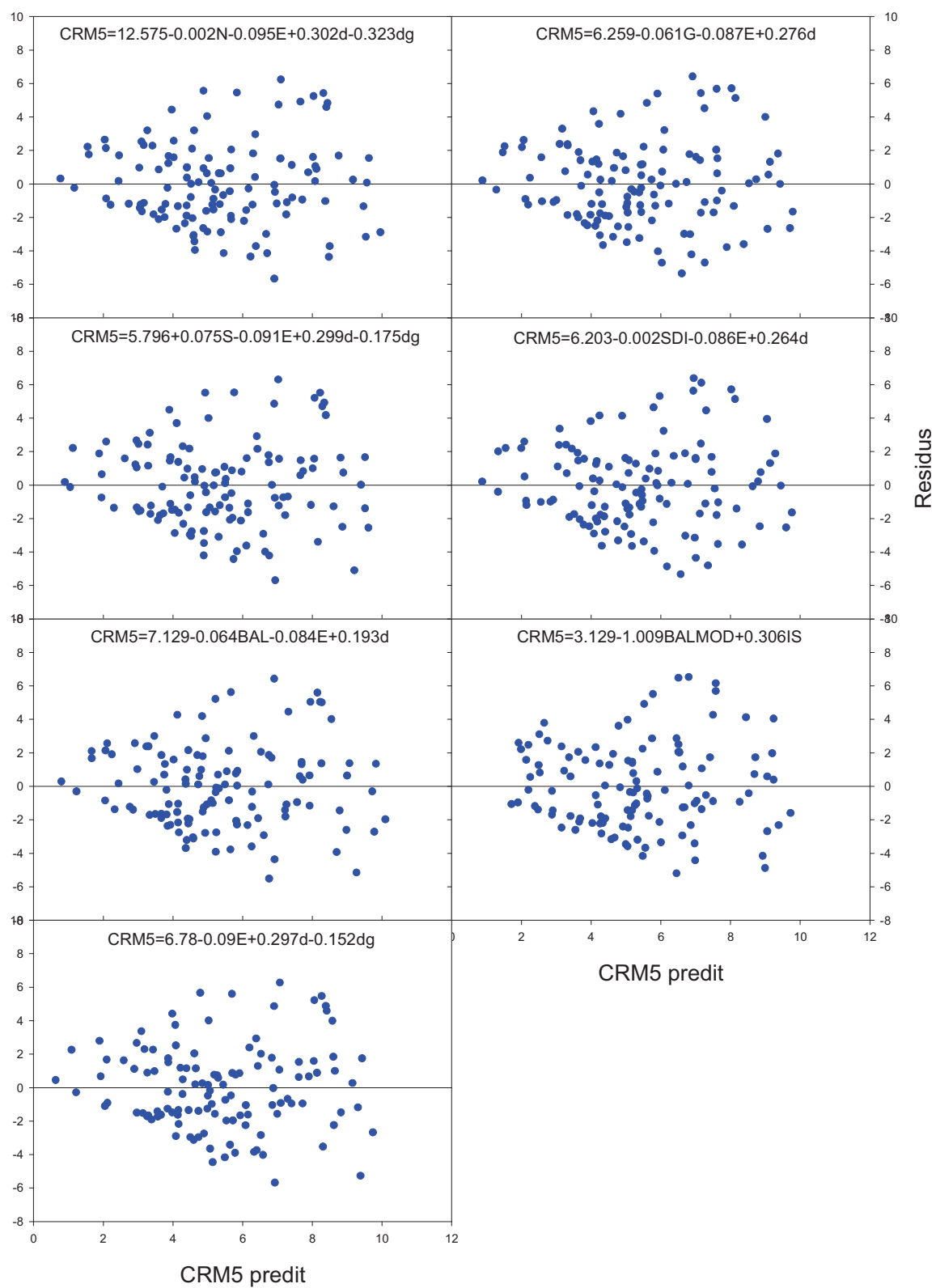
7.3.1 AJUST DE FUNCIONS ALÇADA-DIÀMETRE



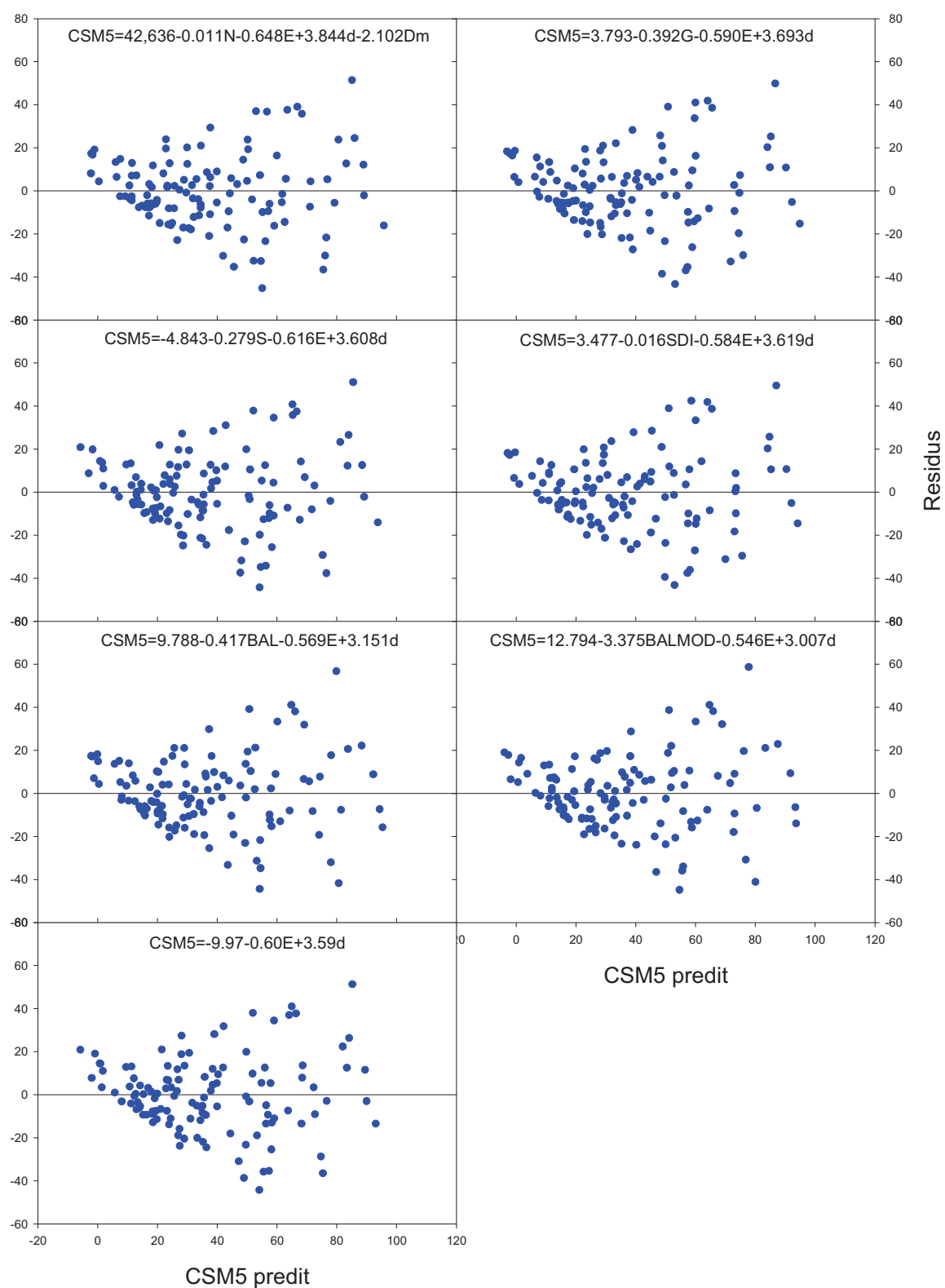




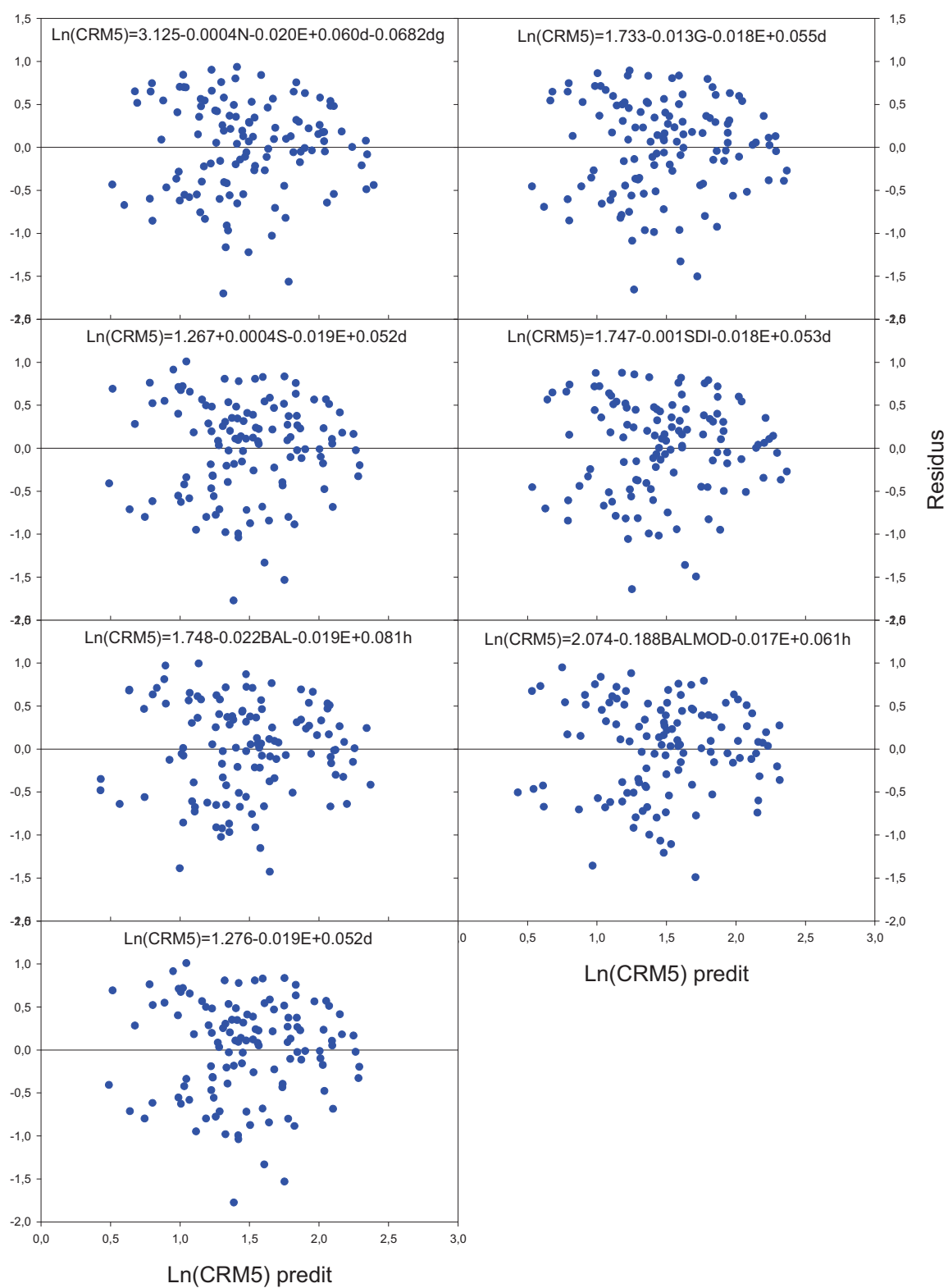
7.3.2 AJUST DE MODELS DE CREIXEMENT DIAMETRAL AMB VARIABLE DEPENDENT CRM5



7.3.3 AJUST DE MODELS DE CREIXEMENT DIAMETRAL AMB VARIABLE DEPENDENT CSM5



7.3.4 AJUST DE MODELS DE CREIXEMENT DIAMETRAL AMB VARIABLE DEPENDENT $\text{Ln}(\text{CRM5})$



7.3.5 AJUST DE MODELS DE CREIXEMENT DIAMETRAL AMB VARIABLE DEPENDENT $\text{Ln}(\text{CSM5})$

