

UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA  
INSTITUTO SUPERIOR DE AGRONOMIA

# Análise da Potencialidade Produtiva do Castanheiro em Portugal

Maria do Sameiro Ferreira Patrício

**Dissertação apresentada neste Instituto para obtenção do grau de Doutor**

**Orientador:** Doutora Maria Margarida Branco de Brito Tavares Tomé

**Júri:**

**Presidente:** Reitor da Universidade Técnica de Lisboa

**Vogais:** Doutor Ângelo Manuel Melo de Carvalho Oliveira, professor catedrático do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa;

Doutora Maria Margarida Branco de Brito Tavares Tomé, professora catedrática do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa;

Doutor Manuel Fernando de Miranda Páscoa, professor coordenador da Escola Superior Agrária de Coimbra do Instituto Politécnico de Coimbra;

Doutora Maria do Loreto Rodrigues Martins Monteiro, professora coordenadora da Escola Superior Agrária de Bragança do Instituto Politécnico de Bragança, na qualidade de especialista;

Doutora Teresa de Jesus Fidalgo Fonseca, professora auxiliar da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro;

Doutor José Augusto Lopes Tomé, professor auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa.

Doutoramento em Engenharia Florestal  
Lisboa, 2006

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. APRESENTAÇÃO, JUSTIFICAÇÃO E OBJECTIVOS

O Plano de Desenvolvimento Sustentável da Floresta Portuguesa (PDSFP) promove o uso de folhosas produtoras de madeiras nobres atribuindo-lhes diversas valências no quadro de um desenvolvimento florestal sustentado. Por outro lado, o Programa Estratégico de Folhosas Produtoras de Madeira Nobre da autoria da DSPE e DSVPF (2002) inclui o castanheiro nas espécies florestais a promover.

No período 1994-1999, o aumento da área arborizada com esta espécie, através de recurso a financiamento público, aproximou-se dos *10 000 ha* localizados maioritariamente nas regiões de Trás-os-Montes e Beira Interior<sup>1</sup>. Somente na área de influência da *DRATM*, no mesmo período, foram arborizados com recurso à aplicação das Medidas Florestais na Agricultura (Reg. CEE 2080/92) e Programa de Desenvolvimento Florestal (PAMAF-Medida 3.1) um total de *7 141,12 ha* dos quais *5 985,89 ha* são povoamentos puros e *1 155,23 ha* povoamentos mistos<sup>2</sup>. Actualmente o castanheiro é a espécie folhosa mais utilizada nas arborizações em Trás-os-Montes, o que demonstra o interesse dos proprietários por esta espécie para produção de madeira. A área total ocupada pela espécie é de *40 579 ha* dos quais *33 765 ha* se localizam no Norte e destes *25 334 ha* em Trás-os-Montes, segundo os resultados do inventário florestal nacional<sup>3</sup> publicado em 2001. Actualmente, estima-se que esta área ultrapasse os *50 000 ha*. Trata-se de uma espécie em franca expansão quer para fruto quer para madeira, com um forte potencial de produção nas condições climáticas e ecológicas do norte de Portugal, como indicam os estudos baseados nos poucos povoamentos de alto fuste adulto existentes.

Dos cerca de *50 000 ha* ocupados pela espécie estima-se que aproximadamente *10 %* sejam povoamentos em regime de talhadia, não se conhecendo, com exactidão, a área ocupada pelo alto fuste. Sabe-se, contudo, que em Trás-os-Montes, onde a espécie tem maior representação, a área ocupada pelo alto fuste ronda os *14 %* do total nacional, constituídos essencialmente por povoamentos jovens, uma vez que os povoamentos adultos identificados ocupam uma área muito reduzida<sup>4</sup> (*7,6 ha*).

---

<sup>1</sup> Fonte DSPE e DSVPF (2002).

<sup>2</sup> Fonte Base de Dados Projectos Florestais DVPF/DRATM (2002).

<sup>3</sup> Baseado na cobertura aerofotográfica de 95

<sup>4</sup> Resultado do levantamento com GPS dos povoamentos conhecidos de alto fuste adulto na região de Trás-os-Montes e Entre Douro e Minho, efectuado no âmbito deste trabalho. Em 2004 a área é de apenas 4,7 ha uma vez que um dos povoamentos foi submetido a corte final com sementões.

O crescente interesse pela espécie nas novas arborizações, associado à sua área potencial de expansão, faz aumentar a necessidade de investigação aplicada que proporcione resposta em tempo útil sob formas de condução e definição de modelos de silvicultura adequados a este tipo de povoamentos<sup>1</sup> com vista à obtenção de madeira de qualidade, tendo por base os critérios da sustentabilidade, promovendo simultaneamente as diversidades biológica e da paisagem.

Assim, a análise da potencialidade produtiva da espécie em regime de alto fuste que nos propusemos realizar ao longo deste trabalho é de extrema importância, já que os modelos de crescimento e produção permitem avaliar e quantificar, nas suas vertentes silvícolas e económicas, as intervenções culturais, maximizando as funções produtivas de forma sustentada. Por este facto, torna-se imprescindível a definição de modelos de crescimento e produção para a espécie, uma vez que no momento em que iniciámos esta dissertação muito poucos estudos biométricos para o castanheiro em alto fuste se encontravam disponíveis, resumindo-se praticamente a tabelas de volume e curvas hipsométricas locais (Fortuna, 1969; Nunes, 2001) e estudos de crescimento e produção limitados (Páscoa, 1987b; Maia *et al.*, 1990). Por outro lado, é importante e inadiável, estudar os poucos povoamentos adultos ainda existentes, caso contrário só daqui a 40 ou 50 anos, no mínimo, será possível obter instrumentos para a gestão dos povoamentos de castanheiro, uma vez que os povoamentos adultos se aproximam da idade de corte<sup>2</sup>.

Neste contexto, desenvolveu-se o presente trabalho cujo *objectivo é a análise da potencialidade produtiva do castanheiro em regime de alto fuste. Para alcançar este objectivo utilizámos os dados recolhidos em parcelas permanentes, ensaios e parcelas temporárias, complementados com análise do tronco em árvores abatidas nos povoamentos adultos existentes. Assim, modelou-se o crescimento em altura dominante, assim como o crescimento da árvore individual e desenvolveram-se curvas de classe de qualidade. Uma relação hipsométrica geral e um sistema de equações para estimação do volume total e por categorias de aproveitamento, assim como uma equação de perfil do tronco para predição dos diâmetros a níveis superiores do tronco, complementam o modelo de árvore. Efectuou-se ainda a determinação do N, P, K, Ca, Mg, S, B e C nos diversos componentes da biomassa e desenvolveu-se um sistema de equações para estimação da biomassa e mineralomassa totais e por componentes.*

---

<sup>1</sup> Necessidade reconhecida pela DSPE e DSVPF (2002) in “Programa Estratégico de Folhosas Produtoras de Madeira Nobre”

<sup>2</sup> O maior povoamento de alto fuste conhecido no Norte, com 2,9 ha e cujos dados foram usados neste estudo, foi abatido em corte final em 2003.

*Foi ainda nosso objectivo desenvolver um modelo de árvore individual de crescimento em diâmetro independente da distância do tipo função potencial x função modificadora.*

*Por fim, com os dados disponíveis, pretende-se obter uma tabela de produção provisória para o castanheiro.*

Com a instalação de parcelas permanentes em plantações novas para acompanhar o desenvolvimento desta espécie na fase juvenil lançaram-se também as bases para estudos futuros entre os quais o aperfeiçoamento dos modelos aqui obtidos.

Este trabalho insere-se numa linha de investigação mais alargada que deverá incluir estudos ao nível do solo e da qualidade da madeira. Espera-se no final que estes instrumentos contribuam para a análise da sustentabilidade dos sistemas de produção existentes, bem como para aumentar o conhecimento sobre a interdependência entre a produtividade e a qualidade da madeira e sua relação com os factores da estação.

## CAPÍTULO I

### A ÁREA DE ESTUDO

#### 1.1. CARACTERIZAÇÃO DOS LOCAIS DE ESTUDO

##### 1.1.1. Áreas estudadas

Os dados utilizados neste estudo são provenientes de povoamentos regulares de castanheiro em regime de alto fuste localizados a norte do rio Douro. É na zona norte que esta espécie tem a sua maior representação com 43 000 dos 50 000 hectares, aproximadamente, existentes em Portugal.

A Figura 1.1 apresenta a distribuição do castanheiro no contexto geral das restantes espécies a nível nacional, bem como a localização das áreas de estudo. Os povoamentos jovens estudados localizam-se nos Concelhos de Bragança e Vila Flor e os povoamentos adultos nas serras de Bornes (Concelho de Macedo de Cavaleiros), Padrela (Concelho de Vila Pouca de Aguiar) e Marão (Concelho de Amarante).

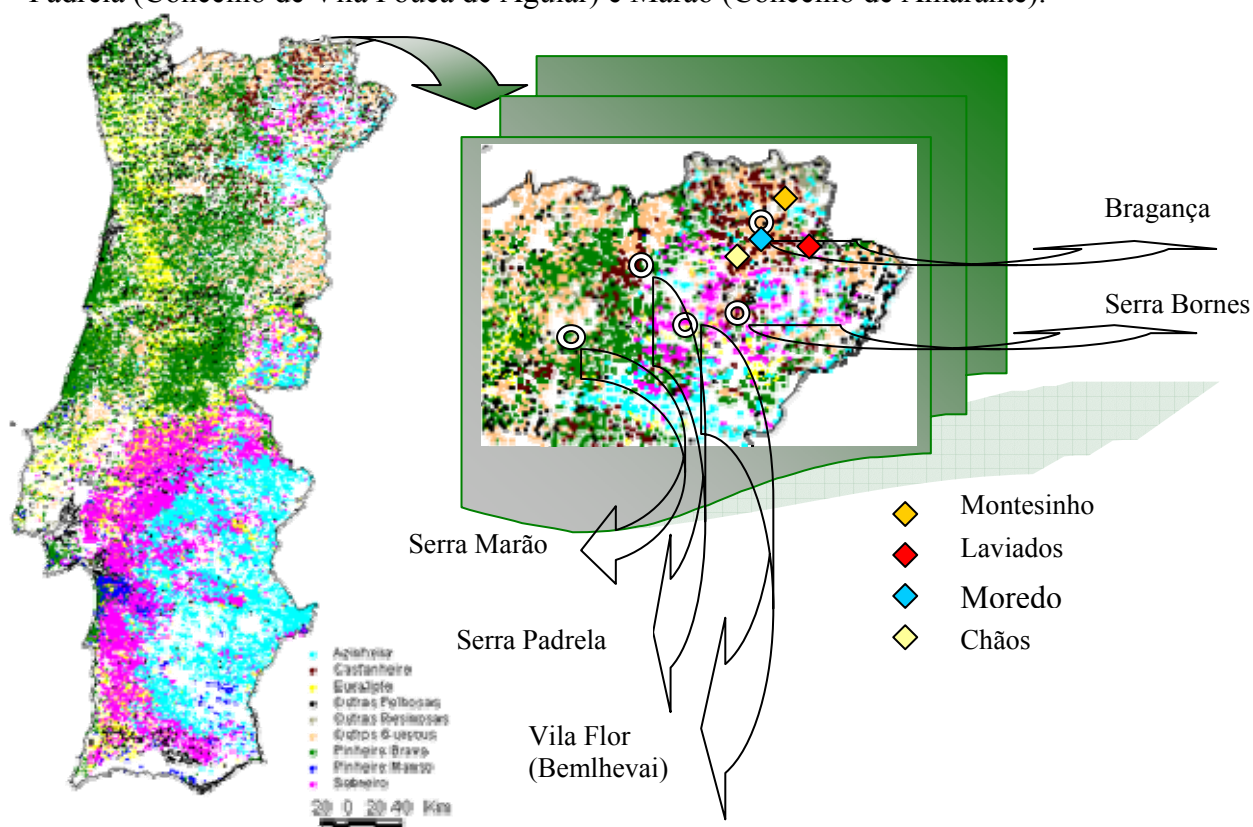


Figura 1.1: Distribuição do castanheiro em Portugal (Fonte: Inventário Florestal Nacional, 2001) e localização dos povoamentos em estudo.

No decorrer deste estudo foram instaladas parcelas permanentes em povoamentos jovens, pertencentes a particulares, no Concelho de Bragança (Montesinho, Laviados, Moredo e Chãos).

Para além destes povoamentos jovens, foram consideradas três parcelas, correspondentes aos tratamentos com castanheiro puro de um ensaio de consociação de castanheiro com pseudotsuga, delineado em blocos casualizados, localizado em Bemlhevai, Concelho de Vila Flor.

### **1.1.2. Características estacionais gerais**

Seguidamente, faz-se uma breve caracterização dos locais de estudo, designados pelo nome das serras, no caso dos povoamentos adultos, e pelo nome dos locais nos povoamentos jovens, por serem bastante diferenciados.

Como já se disse os povoamentos adultos estudados situam-se nas serras de Bornes, Marão e Padrela. Estes povoamentos inserem-se em terrenos baldios submetidos ao regime florestal e pertencem, respectivamente, às aldeias de Limãos, Ansiães e Bornes de Aguiar.

#### ***Bornes***

Na serra de Bornes estudou-se um povoamento de alto fuste adulto com 0,58 ha. Este povoamento está localizado na carta militar nº 78 dos Serviços Cartográficos do Exército, à escala 1:25 000 com as coordenadas 41° 29' 42'' de latitude N e 6° 55' 12'' de longitude a oeste (W) do meridiano de Greenwich. A altitude é de 800 m com exposição predominante nor-nordeste (N.NE.) e relevo ondulado com declives da ordem dos 15 a 20°. Segundo Albuquerque (1982) esta estação inscreve-se na região Montana Subatlântica (SA) com a seguinte silva climática:

- *Betula celtiberica*
- *Castanea sativa*
- *Quercus pyrenaica*
- *Taxus bacata*.

A temperatura média anual é de 11,9 °C, a temperatura máxima absoluta é de 37,2 °C, atingida no mês de Junho, e a mínima absoluta é de -11,4 °C, observada no mês de Janeiro. A precipitação total anual é de 1009,4 mm com um máximo de 145,7 mm atingido em Fevereiro e um mínimo de 17,8 mm registado em Julho, de acordo com dados de “O Clima de Portugal”, Fascículo XLIX, das estações udométrica de Bornes

(41° 28' de latitude N e 7° 01' de longitude W e 700 m de altitude) e climatológica de Bragança (41° 48' de latitude N e 6° 44' de longitude W e 690m de altitude) referentes a valores médios de 1951 a 1981. O período de geadas é relativo à estação climatológica de Bragança e vai de Setembro a Maio, com o máximo de dias de geadas em Janeiro (12,5 dias) e o mínimo em Setembro (0,2 dias). A temperatura média é superior a 10 °C de Abril a Outubro.

Relativamente aos solos, embora a unidade principal seja constituída por leptossolos distrícos órticos derivados de xistos e rochas afins (Agroconsultores e Coba, 1991), ao nível de micro escala do povoamento foram encontrados cambissolos na análise por nós efectuada com recurso à abertura de 5 perfís com profundidade superior a 1 m. No Anexo I é apresentada a descrição morfológica, física e química de um perfil tipo para os diferentes povoamentos em estudo, à excepção de Bemlhevai. Maia (1988) apresenta a caracterização dos solos para este local.

### **Marão**

No Marão, estudou-se o único povoamento de alto fuste adulto conhecido nesta serra. O povoamento situa-se na freguesia de Ansiães, concelho de Amarante e é dividido pela ribeira da Póvoa com uma área de 0,43 ha do lado esquerdo e 0,54 ha do lado direito. Localiza-se na carta militar n° 114 à escala 1:25 000 com as coordenadas 41° 14' 46'' de latitude N e 7° 55' 04'' de longitude W com uma altitude de 900 m. A exposição é su-sueste (S.SE.) com relevo aplanado e declives de 5 a 10°. Segundo a Carta Ecológica de Albuquerque (1982) esta estação inscreve-se no nível Montano, zona Atlante-subatlântica (A.SA) com a seguinte silva climática:

- *Betula celtiberica*
- *Castanea sativa*
- *Quercus pyrenaica*
- *Quercus robur*
- *Taxus bacata*.

A temperatura média anual é de 13,4 °C, a temperatura máxima absoluta é de 39,7 °C, atingida no mês de Julho, e a mínima absoluta é de -6,8 °C, observada no mês de Dezembro. A precipitação total anual é de 2505,4 mm com um máximo de 398,2 mm atingido em Janeiro e um mínimo de 24,2 mm registado em Julho, de acordo com dados de “O Clima de Portugal”, Fascículo XLIX, das estações udométrica de Campeã (41° 17' de latitude N e 7° 54' de longitude W e 800 m de altitude) e climatológica de Vila

Real (41° 19' de latitude N e 7° 44' de longitude W e 481 m de altitude) referentes a valores médios de 1951 a 1981. O período de geadas é relativo à estação climatológica de Vila Real e vai de Outubro a Abril, com o máximo de dias de geadas em Dezembro (9,2 dias) e o mínimo em Outubro (0,5 dias). A temperatura média é superior a 10 °C de Abril a Outubro.

Relativamente aos solos, embora predominem nesta zona os leptossolos úmbricos derivados de xistos ou granito (Agroconsultores e Coba, 1991), no povoamento em estudo foram encontrados fluvisolos na análise por nós efectuada com recurso à abertura de 5 perfis com profundidade superior a 1 m.

### ***Padrela***

O povoamento adulto conhecido com maior dimensão situava-se na Padrela, num local denominado Vale do Carro<sup>1</sup>, com uma área de 2,9 ha, localizado na carta militar n° 74 à escala 1:25 000 com as coordenadas 41° 31' 47'' de latitude N e 7° 35' 22'' de longitude W. Insere-se na contiguidade de uma linha de água com exposição predominante nor-nordeste (N.NE) no lado da estrada e su-sudoeste (S.SW) no lado oposto, com declive de 25 a 30° e uma altitude de 850 m. Segundo a Carta Ecológica de Albuquerque (1982) esta estação inscreve-se no andar fitoclimático Montano, zona Subatlântica (SA) com a seguinte silva climática:

- *Betula celtiberica*
- *Castanea sativa*
- *Quercus pyrenaica*
- *Taxus bacata*.

A temperatura média anual é de 12,5 °C, a temperatura máxima absoluta é de 37,5 °C, atingida no mês de Agosto, e a mínima absoluta é de -7,4 °C, observada nos meses de Janeiro e Fevereiro. A precipitação total anual é de 1132,8 mm com um máximo de 167,5 mm atingido em Janeiro e um mínimo de 10,9 mm registado em Julho, de acordo com dados de “O Clima de Portugal”, Fascículo XLIX, das estações udométrica da Padrela (41° 34' de latitude N e 7° 30' de longitude W e 950 m de altitude) e climatológica de Pedras Salgadas (41° 33' de latitude N e 7° 36' de longitude W e 613m de altitude) referentes a valores médios de 1951 a 1981. O período de geadas é relativo à estação climatológica de Pedras Salgadas e vai de Setembro a Junho, com o

---

<sup>1</sup> Povoamento submetido a corte raso com sementões em 2003.

máximo de dias de geadas em Fevereiro (17,3 dias) e o mínimo em Junho (1,1 dias). A temperatura média é superior a 10 °C de Abril a Outubro.

Relativamente aos solos, embora a unidade principal seja constituída por leptossolos distrícos órticos derivados de xistos e rochas afins (Agroconsultores e Coba, 1991), ao nível de micro escala verifica-se alguma heterogeneidade em termos de solo do povoamento, predominando contudo os regossolos. A análise local foi efectuada com base em 5 perfis com profundidade superior a 1 m.

### ***Bragança***

Relativamente aos povoamentos jovens estes localizam-se na região de Bragança com altitudes que variam dos 640 aos 890 m e declives dos 2 aos 15°. Todos os povoamentos se situam nos andares fitoclimáticos Submontano e Montano na zona ecológica Ibero-subatlântica (I.SA) com a seguinte silva climática:

- *Betula celtiberica*
- *Castanea sativa*
- *Quercus pyrenaica*
- *Quercus rotundifolia*
- *Taxus bacata*.

Os povoamentos jovens de castanheiro localizam-se em Chãos, Moredo, Laviados e Montesinho. As características específicas de cada parcela são apresentadas no Quadro 1.1. Relativamente a estes povoamentos apenas se apresentam os dados referentes às precipitações retirados dos postos udométricos de Pinela (Moredo e Chãos), Montesinho (Montesinho) e a estação climatológica de Bragança para Laviados, sendo os valores da temperatura os já anteriormente referidos concernentes à estação climatológica de Bragança. Assim, a precipitação média anual nos povoamentos de Moredo e Chãos é de 1052,6 mm, em Laviados, 741,1 mm e em Montesinho 1262,8 mm.

No que se refere aos solos, abriu-se um perfil em cada uma das parcelas instaladas. No Anexo I é apresentado um perfil tipo para cada povoamento considerado. O tipo de solo correspondente à unidade principal onde se insere cada um dos povoamentos é apresentado no Quadro 1.1.

### ***Bemlhevai***

No que se refere a Bemlhevai o ensaio está instalado nas coordenadas 41° 24' de latitude N e 7° 6' de longitude W e 710 m de altitude. Ecologicamente consta do andar

fitoclimático submontano, zona subatlântica atlante-mediterrânea (SA.AM) em cuja silva climática se inclui o castanheiro. Uma vez que se usaram apenas dados parciais do ensaio localizado neste sítio não se apresenta a sua descrição em pormenor. Uma caracterização mais detalhada do ensaio pode ser encontrada em Maia (1988).

## 1.2. METODOLOGIA DE RECOLHA DE DADOS

No decorrer deste estudo foram instaladas 15 parcelas permanentes em propriedade privada, com uma área individual de 3 000 m<sup>2</sup> e 50 x 60 m de lado no concelho de Bragança (3 em Montesinho, 3 em Laviados, 6 em Moredo e 3 nos Chãos). Por se tratar de povoamentos muito jovens, com idades que variam entre os 4 e os 7 anos de idade à data da instalação (repouso vegetativo 2002 - 2003), optou-se por estabelecer parcelas com maior dimensão para garantir a manutenção de um número suficiente de árvores na idade adulta, após aplicação do plano orientador de gestão. À maior dimensão das parcelas está associado, naturalmente, maiores dificuldades na sua instalação, relacionadas sobretudo com a dimensão da propriedade e homogeneidade do local. Durante o processo de instalação as parcelas foram geo-referenciadas e elaborados os respectivos croquis para identificação futura.

Nestas parcelas marcou-se o nível de 1,30 m com um traço de tinta em todas as árvores e assinalaram-se as árvores limite com duas faixas de tinta ao nível do cepo. Em termos dendrométricos mediu-se o diâmetro  $d$ , sempre que possível, e a altura total  $h$  em todas as árvores. Na Figura 1.2 apresenta-se um aspecto geral de dois povoamentos onde foram instaladas três parcelas em cada um deles, com a sua localização aproximada.



Figura 1.2: Aspecto geral de dois povoamentos jovens localizados em Chãos e Moredo onde foram instaladas as parcelas assinaladas (posição aproximada).

Quadro 1.1: Características das parcelas permanentes instaladas em povoamentos jovens de castanheiro em regime de alto fuste.

Parcela	Carta Militar	Latitude (N)	Longitude (W)	Coord. Gauss		Altitude Média (m)	Declive	Exposição	Solo**	Zona Ecol.
				X	Y					
Moredo a	12	41°40'09''	6°47'48''	311 183	522 947	840	10°	SW	Leptossolos dístricos órticos de xistos e afins	I.SA
Moredo b	12	41°40'01''	6°47'46''	311 224	522 696	830	9°	SW-W	Leptossolos dístricos órticos de xistos e afins	I.SA
Moredo c	12	41°40'13''	6°47'37''	311 420	523 054	835	4°	E-SE	Leptossolos dístricos órticos de xistos e afins	I.SA
Moredo d	12	41°39'33''	6°47'47''	311 221	521 830	870	-	-	Leptossolos dístricos órticos de xistos e afins	I.SA
Moredo e	12	41°39'32''	6°47'49''	311 172	521 809	860	11°	SE	Leptossolos dístricos órticos de xistos e afins	I.SA
Moredo f	12	41°39'30''	6°48'13''	310 623	521 732	840	10°	SW	Leptossolos dístricos órticos de xistos e afins	I.SA
Chãos a	64	41°38'13''	6°50'27''	307 549	519 297	730	10°	SW	Luvisolos crómicos de rochas básicas	I.SA
Chãos b	64	41°37'23''	6°50'45''	307 155	517 765	740	8°	N	Luvisolos crómicos de rochas básicas	I.SA
Chãos c	64	41°37'20''	6°50'44''	307 187	517 674	800	-	-	Luvisolos crómicos de rochas básicas	I.SA
Montesinho a	12	41°55'22''	6°43'08''	317 182	551 215	890	8,5°	NE	Leptossolos úmbricos de xistos e afins	I.SA
Montesinho b	12	41°55'19''	6°43'11''	317 126	551 117	880	6°	NE	Leptossolos úmbricos de xistos e afins	I.SA
Montesinho c	12	41°55'25''	6°42'54''	317 513	551 308	850	15°	N-NE	Leptossolos úmbricos de xistos e afins	I.SA
Laviados a	25	41°50'25''	6°40'21''	321 190	542 117	660	9°	SW	Leptossolos dístricos órticos de xistos e afins	I.SA
Laviados b	25	41°50'23''	6°40'22''	321 165	542 042	640	9°	SW	Leptossolos dístricos órticos de xistos e afins	I.SA
Laviados c	25	41°50'24''	6°40'25''	321 102	542 088	645	9°	SW	Leptossolos dístricos órticos de xistos e afins	I.SA

\*\* Unidade principal, Agroconsultores e Coba (1991).

Para além destes povoamentos jovens foram considerados os dados, do já referido ensaio de consociação de castanheiro com pseudotsuga, em apenas três parcelas testemunha com castanheiro puro com um compasso de  $4 \times 2 \text{ m}$  e uma área individual de  $512 \text{ m}^2$ . Relativamente a este ensaio foram considerados os dados de 5 medições escalonadas no tempo, desde 1988 a 2000, ou seja dos 7 aos 19 anos de idade.

Para a caracterização dos povoamentos adultos foram instaladas ou reavaliadas parcelas nos três locais previamente identificados.

Seguidamente faz-se uma breve caracterização dendrométrica dos locais de estudo bem como uma sumária apresentação dos dados aí recolhidos. A descrição detalhada da metodologia de recolha de dados é apresentada no início do respectivo capítulo uma vez que os ficheiros de dados variam consoante o tema e os dados disponíveis. Assim, ao longo deste trabalho foram recolhidos dados quer em árvores em pé quer em árvores abatidas para análise do tronco ou biomassa, ou ainda provenientes das medições recolhidas no povoamento submetido a corte final. Para além dos dados recolhidos nesta fase contou-se com os dados disponíveis obtidos anteriormente e que serão mencionados sempre que se achar oportuno.

O povoamento de Bornes foi medido praticamente na totalidade em 2001. Relativamente a este povoamento considerou-se, para além da informação recolhida nesta fase, os dados de uma parcela permanente de  $500 \text{ m}^2$  aí instalada em 1990.

Na Padrela para além do povoamento localizado no Vale do Carro, o qual foi medido na sua totalidade, consideraram-se também os dados recolhidos em duas parcelas permanentes de  $1000 \text{ m}^2$ . Uma das parcelas localizava-se num povoamento de alto fuste abatido em 1990, com 50 anos de idade e cuja continuidade em regime de talhadia tem vindo a ser acompanhada desde então. A outra parcela situa-se no povoamento de alto fuste actualmente com maior área referenciado na serra da Padrela. Este povoamento com uma idade de 60 anos possui uma área de 1,9 ha e pertence à aldeia de Nozedo. No seguimento deste trabalho os povoamentos da Padrela são designados por **A** (povoamento abatido em 1990), **B** (povoamento de 1,9 ha) e **C** (povoamento do Vale do Carro).

Na Figura 1.3 é apresentada a carta perimetral do povoamento resultante do levantamento da área com *GPS*, sobreposta numa fotografia que traduz o aspecto geral dos povoamentos de Bornes e Padrela (povoamento C).

O povoamento do Marão encontra-se dividido pela Ribeira da Póvoa. Neste povoamento foram considerados os dados das duas parcelas permanentes de  $500 \text{ m}^2$

cada instaladas em 1992, uma circular na margem esquerda e outra rectangular na margem direita da linha de água. Em 2000, mediram-se novamente estas parcelas bem como a totalidade da mancha localizada na margem direita da ribeira.

Na Figura 1.4 é apresentada a carta perimetral do povoamento resultante do levantamento da área com *GPS*, sobreposta numa fotografia que traduz o aspecto geral do povoamento.



Figura 1.3: Levantamento perimetral dos povoamentos de Bornes e Padrela (Vale do Carro) com *GPS* e aspecto geral dos mesmos.



Figura 1.4: Levantamento perimetral do povoamento do Marão com *GPS* e aspecto geral dos mesmos no decorrer do abate das árvores.

Nos povoamentos adultos procedeu-se à numeração das árvores e marcação do nível de  $1,30\text{ m}$  de altura para medição do diâmetro. Mediu-se a distância e o azimute relativamente a um ponto de referência. Obtidas as coordenadas polares calcularam-se, mediante o uso de fórmulas trigonométricas, as coordenadas rectangulares relativamente ao centro do eixo de coordenadas. Estes dados foram usados posteriormente para a elaboração da cartografia dos povoamentos.

A recolha de dados nas árvores em pé foi efectuada durante o período de repouso vegetativo com início em *2000-2001*. Mediu-se o diâmetro a  $1,30\text{ m}$  de altura  $d$ , a altura total  $h$ , a altura da copa viva e o diâmetro da copa de todas as árvores. Para a medição das copas foram considerados 8 raios medidos segundo as direcções  $N-S$ ,  $E-W$  e pontos intermédios. Aplicou-se a classificação de Kraft para determinar o posicionamento das árvores no coberto. No povoamento *C* da Padrela efectuou-se também a cubagem rigorosa das árvores em pé com telerelascópio num total de 269 árvores, cubadas de  $2,25$  em  $2,25\text{ m}$ , a partir do  $d$ .

Efectuadas as medições das árvores em pé foram seleccionadas para abate 34 árvores (18 na Padrela – Povoamento *C*; 9 no Marão; 7 em Bornes). Na selecção das árvores para abate teve-se em conta a sua distribuição no povoamento e frequência por classe de  $d$ . Estas árvores foram usadas para análise do tronco e simultaneamente para a determinação da biomassa. A metodologia aplicada é descrita separadamente nos capítulos onde foram utilizados estes dados, nomeadamente os Capítulos II e V. Para além destas 34 árvores abateu-se mais uma árvore dominante no povoamento *B* da Padrela que foi utilizada somente para análise do tronco. Contou-se ainda com mais 4 árvores dominantes abatidas anteriormente (1 do povoamento *A* da Padrela, 1 de Bornes e 2 do Marão) para análise do tronco.

O povoamento *C* da Padrela foi submetido a corte final com sementões no repouso vegetativo de *2002-2003*. Os sementões foram seleccionados previamente tendo em conta as árvores do povoamento que apresentavam maior vigor, troncos mais direitos e cilíndricos e copa melhor equilibrada, bem como a sua distribuição espacial. Acompanhou-se o corte final tendo sido medidas 125 árvores não bifurcadas para cubagem rigorosa mas apenas da parte comercial, uma vez que não foi possível medir as árvores inteiras por questões de segurança e de interferência no rendimento do trabalho da equipa de extracção a cargo de particulares.

No Quadro 1.2 apresenta-se a caracterização dendrométrica das parcelas de estudo, quer dos povoamentos jovens, quer dos povoamentos adultos.

Quadro 1.2: Caracterização dendrométrica das parcelas.

Local	Ano medição	Área parc. (m <sup>2</sup> )	Idade (anos)	N	d <sub>g</sub> (cm)	h <sub>g</sub> (m)	d <sub>dom</sub> (cm)	h <sub>hom</sub> (m)	G (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )
Bornes	1990	500	35	1480	19,9	19,4	30,2	21,7	49,6
Bornes	2000	500	45	1460	25,0	22,0	37,0	24,5	70,4
Marão*	1992	500	55	560	38,5	27,9	51,4	30,0	65,3
Marão*	2000	500	63	520	40,5	28,7	53,3	30,6	67,0
Marão	1992	500	55	520	28,1	14,2	35,3	16,5	32,3
Marão	2000	500	63	520	31,4	17,8	39,3	18,0	40,2
Padrela A	1990	1000	49	560	30,0	22,4	40,6	25,1	41,0
Padrela B	2000	1000	56	490	32,6	19,0	40,1	20,6	41,0
Chãos									
a	2002	3000	5	1013	3,2	3,1	5,4	3,5	0,8
b	2002	3000	5	767	2,2	2,7	4,1	3,2	0,3
c	2002	3000	5	1220	3,4	3,0	5,7	3,9	1,1
Moredo1									
a	2002	3000	7	933	6,4	5,4	10,0	6,1	3,0
b	2002	3000	7	863	7,5	5,7	11,1	6,5	3,8
c	2002	3000	7	1076	5,7	4,8	9,9	6,1	2,7
Moredo2									
a	2002	3000	7	990	6,0	4,2	8,7	5,4	2,8
b	2002	3000	7	700	5,2	4,3	7,6	4,8	1,5
c	2002	3000	7	897	5,4	4,0	7,9	4,9	2,0
Montesinho									
a	2002	3000	5	993	2,6	3,0	4,4	3,5	0,5
b	2002	3000	5	737	1,1	2,3	2,3	2,5	0,1
c	2002	3000	5	1023	1,1	2,3	2,3	2,5	0,1
Laviados									
a	2002	3000	4	1023	1,4	2,5	3,2	2,7	0,1
b	2002	3000	4	1037	1,2	2,4	2,8	2,6	0,1
c	2002	3000	4	783	1,1	2,2	2,5	2,5	0,1
Bemlhevai**									
I	1988	512	7	1055	1,5	2,9	2,5	3,1	0,2
II	1988	512	7	1094	3,1	3,2	5,3	3,8	0,8
III	1988	512	7	1152	3,9	4,4	6,4	4,5	1,1
Bemlhevai**									
I	1992	512	11	996	2,7	3,0	4,8	3,8	0,5
II	1992	512	11	1035	6,0	4,0	9,6	5,6	3,2
III	1992	512	11	1152	8,5	5,6	12,0	5,9	5,4
Bemlhevai**									
I	1996	512	15	1035	3,7	3,2	6,4	4,2	1,1
II	1996	512	15	1035	7,4	4,2	11,8	6,2	4,4
III	1996	512	15	1133	10,7	6,6	16,1	7,2	10,2
Bemlhevai**									
I	1998	512	17	976	4,2	3,9	7,2	5,0	1,4
II	1998	512	17	1074	8,5	5,5	13,5	7,5	5,8
III	1998	512	17	957	12,2	7,2	18,3	9,1	13,4
Bemlhevai**									
I	2000	512	19	1035	4,5	4,2	7,9	5,5	1,7
II	2000	512	19	1055	9,0	6,6	14,2	8,5	6,9
III	2000	512	19	957	13,0	6,4	19,5	10,2	15,2

\* Parcela rectangular localizada do lado direito da Ribeira da Póvoa. \*\* Parcelas testemunha com castanheiro puro, uma por bloco, num ensaio de povoamentos mistos.

## CAPÍTULO II

### AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ESTAÇÃO E MODELAÇÃO DO CRESCIMENTO EM ALTURA DOMINANTE

#### 2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A qualidade de uma estação em relação a uma determinada espécie florestal refere-se à produtividade potencial, tanto presente como futura, de um povoamento dessa espécie vegetando nessa estação (Tomé, 1988).

No contexto do ordenamento para produção florestal, a qualidade da estação pode ser definida como “o potencial de um local para produção de madeira de uma determinada espécie ou tipo de floresta particulares” (Clutter *et al.*, 1983).

Para o desenvolvimento de planos de gestão florestal a longo prazo é necessário averiguar a qualidade da estação de cada povoamento individualmente, para todos os povoamentos dentro da unidade de gestão, pois só assim o seu crescimento e desenvolvimento futuro poderão ser previstos com precisão (Alemdag, 1991).

Durante muitos anos, florestais e ecologistas têm tentado desenvolver um verdadeiro sistema de classificação da qualidade das estações que possa ser largamente utilizado para um conjunto de espécies e regiões (Alemdag, 1991). Assim, têm sido usadas duas linhas de investigação principais, uma baseada em factores ecológicos, e a outra em factores dendrométricos. Os ecologistas baseiam a sua classificação da estação na vegetação do sub-bosque, uma vez que as comunidades de plantas são o resultado de vários factores climáticos, edáficos e topográficos associados com o potencial de crescimento do povoamento (Alemdag, 1991). Por outro lado, segundo este autor, os biometristas preferem os métodos directos simples, como o conceito de índice de qualidade da estação, o qual merecerá a nossa especial atenção.

A comparação de diferentes métodos directos (baseados em variáveis dendrométricas) e indirectos (baseados nas condições físicas da estação) levada a cabo por Marques (1991), em povoamentos de pinheiro bravo, permitiu concluir que as estimativas obtidas pelo modelo dos factores da estação, para os primeiros 5 a 10 anos eram significativamente mais precisas do que as estimativas baseadas nas curvas de crescimento em altura dominante. Entre os 15 e os 20 anos as estimativas eram semelhantes e a partir dos 25 anos as estimativas baseadas na altura dominante eram significativamente mais precisas do que as providenciadas pelos factores da estação.

Também Tiarks *et al.* (1997) encontraram uma relação relativamente fraca ( $R^2 = 0,40$ ) entre a altura aos 5 anos de idade e o índice de qualidade da estação. Assim, o índice de qualidade da estação não poderá ser fielmente estimado com alturas provenientes de árvores muito jovens (Devan e Burkhart, 1982).

Embora a verdadeira produtividade da estação possa não ser plenamente representada pelo índice de qualidade da estação, este índice tem aceitação generalizada e constitui provavelmente o método mais simples para estimar a produtividade de um povoamento existente (Sharma *et al.*, 2002).

### **2.1.1. O conceito de estação florestal**

Segundo a *Society of American Foresters* (SAF) a estação (“*site*”) é definida como uma área considerada em termos do seu ambiente, na medida em que este determina o tipo e a qualidade da vegetação que esta área pode envolver (Clutter *et al.*, 1983), ou seja, a totalidade das condições ambientais (bióticas, edáficas e climáticas) existentes num determinado local.

Os chamados “factores da estação” são definidos pelas propriedades do local que se mostrem relevantes para a produção. Incluem-se neste caso os factores climáticos, topográficos, edáficos e bióticos (Marques, 1987).

### **2.1.2. O índice de qualidade da estação e sua avaliação**

O índice de qualidade da estação é a altura média das árvores dominantes (ou dominantes e codominantes) de um povoamento para uma idade de referência específica (Alemdag, 1991). As árvores dominantes e codominantes seleccionadas devem ser saudáveis e ter pertencido sempre a estas categorias ao longo das suas vidas (Goelz e Burk, 1992; Payandeh e Wang, 1994). Este método é, como já se disse, o método mais generalizado, apresentando um risco de erro reduzido devido à sua simplicidade, rapidez e facilidade de entendimento por se tratar de uma expressão numérica da estação, em vez de uma expressão descritiva, facilmente relacionável com o crescimento, produção e gestão ao longo da vida de um povoamento, devido à sua associação com a idade (Alemdag, 1991). Um dos seus inconvenientes é o facto deste poder ser estimado com pouca exactidão para idades afastadas da idade índice (Sharma *et al.*, 2002).

Goelz e Burk (1992) verificaram que muitas vezes a altura dominante é subestimada na idade índice para as boas estações e sobrestimada para as estações mais

pobres. Este enviesamento da predição pode ser devido, em larga escala, às propriedades matemáticas da forma funcional da equação do índice de qualidade da estação e da definição da altura dominante utilizada (Sharma *et al.*, 2002).

A idade índice ou idade de referência é geralmente seleccionada próxima da idade da revolução (Clutter *et al.*, 1983).

O recurso a equações para a determinação do índice de qualidade da estação é um método largamente utilizado, particularmente na América do Norte, mas também na Europa, para providenciar uma medida simples da qualidade das estações florestais baseada no crescimento em altura das árvores dominantes e codominantes (Clutter *et al.*, 1983; Davis e Johnson, 1987; Carmean *et al.*, 1989; Alemdag, 1991).

A determinação do índice de qualidade da estação reveste-se de grande importância, quer directamente para a gestão dos povoamentos florestais, quer indirectamente, uma vez que quando incluído nos modelos de crescimento e produção como variável independente, a capacidade preditiva destes modelos é fortemente melhorada. Neste tipo de modelos as equações de classe de qualidade são usadas para prever a altura dominante futura, a qual é então usada em estimativas da densidade futura e de outras variáveis de povoamento, para prever a produção futura a partir de algum tipo de equação ou modelo de produção.

A produtividade da estação é o “potencial de determinada espécie e local para produzir madeira” (Vanclay, 1992). Contudo, outros factores para além daqueles que interferem na produtividade da estação, como a densidade do povoamento, afectam o volume da madeira, tornando-o uma medida problemática da produtividade (Avery e Burkhart, 1994). O índice de qualidade da estação é assim usado em substituição do volume porque se encontra altamente correlacionado com ele e é relativamente insensível a variações moderadas na densidade do povoamento (Nigh e Sit, 1996). Segundo estes autores o conceito de índice de qualidade da estação aplica-se a povoamentos puros equiénios e não danificados.

A altura das árvores dominantes, considerada independente da densidade do povoamento, é tida como a melhor medida da produtividade da estação para uma dada espécie (Nigh e Sit, 1996). A altura dominante tem a vantagem de não ser influenciada pelos desbastes de grau leve (Assmann, 1970). O crescimento das árvores dominantes e codominantes, para além de estar relacionado com a produtividade da estação, é tido como relativamente independente da competição e da dinâmica dos povoamentos equiénios (Goelz e Burk, 1998).

Sharma *et al.* (2002), de entre as várias definições de altura dominante testadas para a construção do índice de qualidade da estação, elegeram como melhor definição a altura média das mesmas árvores dominantes e codominantes que persistiram nesta forma ao longo da vida do povoamento. Esta definição é contudo impossível de utilizar nos povoamentos reais (dos quais não se conhece o passado), ficando restringida ao uso em parcelas permanentes e ensaios.

### **2.1.3. Modelação do crescimento em altura dominante**

Os modelos de crescimento em altura dominante descrevem o desenvolvimento em altura dominante dos povoamentos com índices de qualidade da estação conhecidos. Podem também estimar índices de qualidade da estação a partir da altura e da idade, directamente, quando o modelo é invertível ou usando uma técnica numérica de iteração, no caso contrário. A inversão dos modelos de crescimento em altura dominante para expressar o índice de qualidade da estação como função da altura e da idade, é muitas vezes matematicamente impossível (Nigh e Sit, 1996). Segundo estes autores muitos modelos altura-idade são formulados de acordo com as seguintes condições:

1. Passar pelo ponto ( $SI$ , idade padrão), portanto são modelos altura-idade condicionados.
2. A altura do povoamento é a altura dominante, *i. e.*, a altura média das 100 árvores mais grossas por hectare, dado que existem muitas definições (descritas por exemplo em Patrício, 1996), a escolha deve cair sobre aquela que melhor traduza a produtividade da estação.
3. A idade pode ser a idade total ou a idade à altura do peito. O uso da idade à altura do peito elimina a variação no crescimento em altura causada pelos factores que não fazem parte da estação (Monserud, 1984) como a competição dos arbustos e os tratamentos aplicados na fase de instalação dos povoamentos.

As várias metodologias para a determinação da idade resultam em interpretações similares na estrutura das idades do povoamento actual somente se as primeiras taxas de crescimento em altura não variarem de árvore para árvore, o que é pouco provável que aconteça (Palik e Pregitzer, 1995). Segundo estes autores a idade à altura do peito, com ou sem factor de correcção, pode não ser adequada para estudos que necessitem da determinação precisa do número de anos que uma árvore demora a estabelecer-se. Vários autores, entre eles Carmean e Lenthall (1989), Payandeh e Wang (1994), Goelz e Burk (1998), Nigh (2001), utilizaram a idade à altura do peito, com ou sem correcção,

para a determinação das classes de qualidade. As correcções utilizadas por Palik e Pregitzer (1995) para a obtenção da idade com base no número de anéis observado a 1,30 m, são baseadas no número médio de anos necessário para atingir a altura do peito o qual varia com a espécie e o tipo de regeneração. Foram encontrados valores médios de 3 anos para a *Populus grandidenata*, 14 anos para a *Quercus rubra*, 16 anos para o *Acer rubrum* e 21 anos para a *Pinus strobus*, para atingir a altura do peito em plantas provenientes de regeneração natural no mesmo povoamento. Outros, por sua vez, utilizam a idade total como Boyer (2001), Johansson (1999), assim como a maioria dos autores portugueses, entre os quais, Páscoa (1987), Marques (1987), Tomé (1988) e Tomé *et al.* (2001).

#### **2.1.3.1. Atributos desejáveis para as curvas de classe de qualidade**

Goelz e Burk (1992) apresentam alguns critérios correspondentes às características desejáveis para as curvas de classe de qualidade. Assim, as curvas de classe de qualidade devem possuir as seguintes particularidades:

- Ser polimórficas (*vide 2.1.3.3*);
- Apresentar um comportamento biológico apropriado, o que implica:
  - Conter um ponto de inflexão;
  - Possuir uma assíntota, que idealmente deve aumentar com o aumento do índice de qualidade da estação (Devan e Burkhart, 1982; Goelz e Burk, 1992);
  - Predizer a altura zero na idade zero;
- Mostrar um comportamento lógico, por exemplo, não predizer valores da altura absurdos ou improváveis e estimar a altura igual ao índice de qualidade da estação na idade padrão;
- Ter uma base teórica, para que os critérios já referidos sejam incorporados na forma da equação;
- Serem invariantes com a idade padrão, ou seja, poderem ser utilizadas para diversas idades de referência;
- Serem invertíveis. Este atributo permite a uma função predizer o índice de qualidade da estação, baseado numa medição (altura dominante, idade), bem como predizer a altura dominante, baseada no índice de qualidade da estação e na idade padrão;
- Serem parcimoniosas no que diz respeito ao número de parâmetros.

## **2.1.3.2. Tipos de dados para ajustamento de curvas de classe de qualidade**

### **2.1.3.2.1. Quanto à origem dos dados**

Segundo Clutter *et al.* (1983) os dados utilizados para o desenvolvimento de equações de classe de qualidade podem ser:

- Medições de pares (altura dominante, idade) provenientes de parcelas temporárias;
- Medições de pares (altura dominante, idade), em parcelas permanentes ou semi-permanentes;
- Reconstruções do desenvolvimento (altura dominante, idade) em árvores individuais através do método de análise do tronco.

Segundo estes autores, o recurso à medição periódica em parcelas ou em árvores permanentes fornece os melhores dados para o desenvolvimento de equações para definição do índice de classe de qualidade. No entanto este processo de obtenção de dados é bastante moroso (exige o acompanhamento da mesma parcela ao longo do tempo) e dispendioso. Por outro lado, o método de análise do tronco providencia dados quase iguais em qualidade aos anteriores; embora os custos sejam elevados, os dados podem ser obtidos de forma relativamente rápida. Uma aplicação correcta deste método exige que a contagem dos anéis de crescimento seja feita à altura dos verticilos, pelo que será necessário recorrer a correcções quando assim não acontece. Geralmente, este método resulta numa avaliação mais realista da produtividade potencial da estação (Curtis, 1964) devido à obtenção de uma maior quantidade de informação (séries de crescimento reais) de cada árvore amostra, permitindo também estimar padrões de crescimento em altura dominante polimórficos e a altura dominante das árvores da estação na idade padrão (Monserud, 1984).

Contudo, alguns autores sugerem que as curvas de classe de qualidade obtidas com dados provenientes de análise do tronco de árvores dominantes seleccionadas no momento do corte subestimam a altura dominante das árvores jovens e, em consequência, sobrestimam o desempenho e expectativas de produção dos povoamentos jovens (Magnussen e Penner, 1996). A sobrestima do índice de qualidade da estação poderá ser devida à subestima da altura dominante nas primeiras idades, obtida pelo método de análise do tronco das árvores dominantes seleccionadas no momento do

corde uma vez que estas podem ter modificado a sua posição relativa na hierarquia das alturas do povoamento ao longo do tempo.

Actualmente os modelos mais recentes de crescimento em altura dominante são desenvolvidos recorrendo, essencialmente, aos dados provenientes de técnicas de análise do tronco. São exemplo Curtis *et al.* (1974), Carmean (1971), Lloyd e Hafley (1977), Devan e Burkhart (1982), Biging (1985), Marques (1987), Cieszewski e Bella (1989), Stansfield *et al.* (1991), Alemdag (1991), Ker e Bowling (1991), Wang e Payandeh (1993), Payandeh e Wang (1994), Goelz e Burk (1998), Wang (1998), Johansson (1999), Carvalho (2000), Nigh (2001), entre muitos outros. Com esta técnica, o padrão de crescimento em altura da árvore é reconstruído a partir dos dados (altura dominante, idade) registados em cada secção.

A modelação do crescimento em altura dominante no contexto da determinação do índice de qualidade da estação envolve dois processos: (i) estimar a altura dominante a uma idade de referência (índice de qualidade da estação), dada a altura dominante numa outra idade, e (ii) estimar a altura dominante numa determinada idade dada a altura dominante na idade base ou de referência (Goelz e Burk, 1992, 1996). Segundo estes autores os dois processos podem ser modelados por funções individuais para cada processo, ou por uma equação que prediz a altura dominante numa determinada idade, dada a altura dominante em qualquer outra idade conhecida, o que implica a modelação com base em equações às diferenças.

Curtis *et al.* (1974) consideram que as equações separadas providenciam estimativas dos parâmetros mais eficientes para a predição. Porém, Ricker (1973, 1984) acrescenta que tal só se verifica se os dados representarem uma amostra aleatória de uma distribuição normal bivariada. Goelz e Burk (1996) admitem, caso a qualidade da estação de uma população não seja normalmente distribuída, que as equações separadas não descrevem muito bem a tendência e podem mesmo ser inapropriadas para a predição. Também Cieszewski e Bella (1989) referem que, embora o índice de qualidade da estação seja simplesmente a altura dominante numa determinada idade, quando os modelos para o índice de qualidade da estação e altura dominante são derivados separadamente podem tornar-se incompatíveis. Huang (1997) recomenda o uso de uma simples equação do tipo  $h_{dom} = f(SI, idade)$  para predições compatíveis da altura dominante ( $h_{dom}$ ) e do índice de qualidade da estação ( $SI$ ).

### 2.1.3.2.2. Quanto à estrutura dos dados

No ajustamento das curvas de classe de qualidade são utilizados, como já se disse, pares de valores (altura dominante, idade). Dependendo da origem dos dados que se possuem e do método de ajustamento pretendido para as classes de qualidade, estes pares de valores podem ser organizados de diferentes formas, originando diferentes estruturas de dados, dependendo das combinações de pares de valores (altura dominante, idade) utilizadas entre eles. No Quadro 2.1 exemplificam-se emparelhamentos possíveis de dados utilizados por alguns autores em diferentes estudos. Assim, poderemos referir, entre outros, Borders *et al.* (1988) os quais utilizam as estruturas I, III e V; Goelz e Burk (1992) a estrutura VI; Cao (1993) as estruturas III e V; Payandeh e Wang (1994) a estrutura III; Amaro *et al.* (1997) as estruturas III e V.

Quadro 2.1: Exemplificação com uma árvore das estruturas de dados que se podem utilizar na elaboração de curvas de classe de qualidade.

I	II	III	IV	V	VI
$h_1 \ t_1 \ h_2 \ t_2$	$h_1 \ t_1 \ h_2 \ t_2$	$h_1 \ t_1 \ h_2 \ t_2$	$h_1 \ t_1 \ h_2 \ t_2$	$h_1 \ t_1 \ h_2 \ t_2$	$h_1 \ t_1 \ h_2 \ t_2$
4 10 23 80	4 10 23 80	4 10 11 30	4 10 11 30	4 10 11 30	4 10 11 30
	23 80 4 10	11 30 18 60	11 30 18 60	4 10 18 60	4 10 18 60
		18 60 23 80	18 60 23 80	4 10 23 80	4 10 23 80
			11 30 4 10	11 30 18 60	11 30 18 60
			18 60 11 30	11 30 23 80	11 30 23 80
			23 80 18 60	18 60 23 80	18 60 23 80
					11 30 4 10
					18 60 4 10
					23 80 4 10
					18 60 11 30
					23 80 11 30
					23 80 18 60

**Nota:**  
As estruturas de dados apresentadas são geradas a partir da seguinte árvore exemplo:

$h_{dom}(m)$	$t(\text{anos})$
4	10
11	30
18	60
23	80

Adaptado de Huang (1997)

$h_1$ , altura dominante na idade  $t_1$ ;  $h_2$ , altura dominante na idade  $t_2$

Estrutura I, máximo intervalo de tempo observado sem sobreposição; Estrutura II, máximo intervalo de tempo observado com sobreposição; Estrutura III, intervalos de tempo sem sobreposição; Estrutura IV, intervalos de tempo com sobreposição; Estrutura V, todos os intervalos sem sobreposição; Estrutura VI, todos os intervalos possíveis.

### 2.1.3.3. Tipos de feixes de curvas

Clutter *et al.* (1983) classificam as curvas de classe de qualidade de acordo com a natureza da família de curvas altura dominante-idade que geram. Assim, podem originar três modelos distintos de feixes de curvas:

-Anamórficas, em que a altura de uma delas a qualquer idade é uma proporção constante da altura da outra para a mesma idade;

-Polimórficas disjuntas, se essa proporcionalidade não se verificar e as curvas não se cruzarem;

-Polimórficas não disjuntas, igualmente se a proporcionalidade não for constante e as curvas se cruzarem.

O estudo de Borders *et al.* (1984), com a *Pinus elliottii*, demonstrou que as curvas anamórficas parecem ajustar-se melhor para as primeiras idades (inferior a 15 anos) e as curvas polimórficas às idades superiores.

#### **2.1.3.4. Métodos de construção das curvas de classe de qualidade**

Embora tenham sido usadas muitas técnicas para construir curvas de classe de qualidade, Clutter *et al.* (1983) consideram essas técnicas como casos especiais dos três métodos seguintes, sobejamente conhecidos:

- 1- O método da curva guia;
- 2- O método das equações às diferenças;
- 3- O método da predição dos parâmetros.

O método da curva guia consiste basicamente na adaptação dos métodos gráficos às técnicas de análise de regressão. A técnica assenta no ajustamento de uma curva média ao conjunto de dados (altura dominante, idade):

$h_{dom} = f(t; \beta)$ , em que  $\beta$  representa os parâmetros da curva média.

Posteriormente, são traçadas curvas proporcionais à curva média (curva guia), com a mesma forma, recorrendo para isso à detecção de um parâmetro que varie com a classe de qualidade:

$h_{dom} = f(t; \beta_v, \beta_c)$ ,

onde  $\beta_v$  é o parâmetro variável com a classe de qualidade e  $\beta_c$  é o conjunto dos parâmetros comuns (Tomé, 1988). O valor do parâmetro variável é determinado para cada curva, restringindo-se os restantes parâmetros às estimativas dos mesmos, obtidas para a curva média.

A aplicação deste método gera um feixe de curvas anamórficas e pode ser feita recorrendo a dados provenientes de parcelas temporárias, de parcelas permanentes ou de análise de tronco (Clutter *et al.*, 1983). Este método foi aplicado, entre outros, por Oliveira (1980, 1982), Páscoa (1987a), Carmean *et al.* (1989), Nanang e Nunifu (1999), Teshome e Petty (2000).

O método das equações às diferenças consiste no desenvolvimento de uma equação às diferenças a partir da função de crescimento em altura dominante seleccionada para o ajustamento (Clutter *et al.*, 1983). A equação às diferenças assim obtida expressa a altura dominante na idade  $t_2$  ( $hdom_2$ ), em função da altura dominante na idade  $t_1$  ( $hdom_1$ ) e das idades  $t_1$  e  $t_2$ . Esta metodologia é aplicável a parcelas de estudo com pelo menos duas medições ou a dados obtidos pelo método de análise do tronco. O procedimento é bastante flexível e pode produzir curvas anamórficas ou polimórficas. Assim, substituindo o parâmetro da assíntota produz curvas anamórficas. Substituindo outro parâmetro obtêm-se curvas polimórficas com uma assíntota comum. O tipo de curvas que origina depende do modelo de crescimento seleccionado e do processo seguido para obter as equações às diferenças. A forma geral do modelo das equações às diferenças pode ser escrita da seguinte forma:

$hdom_2 = f(hdom_1, t_1, t_2)$ , onde  $hdom$  é a altura dominante e  $t$  a idade, ambos nos momentos  $t_1$  e  $t_2$ .

Para o ajustamento dos modelos de equações às diferenças podem ser usadas as estruturas de dados apresentadas no ponto 2.1.3.2.2.

As equações às diferenças foram aplicadas com sucesso em vários contextos de modelação por Clutter *et al.* (1983), Borders *et al.* (1984), Lappi e Bailey (1988), Tomé (1988), McDill e Amateis (1992), Goelz e Burk (1992, 1996), Payandeh e Wang (1994), Cao *et al.* (1997), Parresol e Vissage (1998), Elfving e Kiviste (1997), Amaro *et al.* (1998), Johansson (1999), Carvalho (2000), Tewari e Kumar (2002), Sharma *et al.* (2002), entre outros.

O método da predição dos parâmetros é aplicável a parcelas de estudo com várias medições ao longo do tempo, ou a dados provenientes do método de análise do tronco. A sua aplicação a períodos de tempo relativamente curtos (inferiores a 40 anos) produz estimativas dos parâmetros instáveis (Elfving e Kiviste, 1997). Segundo Clutter *et al.* (1983), o método da predição dos parâmetros produz curvas de classe de qualidade polimórficas e consiste, basicamente, no ajustamento de um modelo de crescimento em altura dominante a cada árvore, ou a cada parcela, para atribuir um valor do índice de qualidade da estação a cada árvore ou parcela. Por último, através de regressão linear, ou não linear, relaciona os parâmetros assim estimados com a classe de qualidade. Foi utilizado por autores como Stansfield *et al.* (1991), Ker e Bowling (1991), McDill e Amateis (1992).

Segundo Furnival *et al.* (1990), o método de análise da covariância, o método das diferenças algébricas com todas as diferenças possíveis e o método de predição ponderada dos parâmetros, originaram resultados idênticos para equações lineares nos parâmetros e suspeitam de analogias semelhantes para as equações não lineares.

#### **2.1.4. Validação dos modelos de crescimento em altura dominante**

Os modelos de crescimento em altura dominante são usados na gestão florestal para estimar a altura dominante e ou o índice de qualidade da estação e, como qualquer outro modelo, quando da sua aplicação, é útil conhecer o seu enviesamento e precisão para se poder avaliar a validade da sua aplicabilidade. A validação de um modelo fornece uma medida de garantia, quer para o modelador, quer para o utilizador final do modelo.

A validação é definida por Reynolds *et al.* (1981) como “o teste e comparação do *output* do modelo com o que é observado na realidade”. Mais especificamente Nigh e Sit (1996) consideram que a validação consiste na verificação do enviesamento na altura dominante estimada e (ou) índice de qualidade da estação e na determinação da precisão dos modelos. O enviesamento é uma medida da diferença média entre a altura dominante estimada e observada e (ou) índice de qualidade da estação; a precisão é uma medida da variabilidade no erro da altura dominante e (ou) índice de qualidade da estação.

##### **2.1.4.1. Importância da validação**

A avaliação de um modelo baseada num conjunto de dados independentes reveste-se de grande importância porque, segundo Huang (1997), a qualidade do ajustamento no respectivo conjunto de dados não reflecte necessariamente a qualidade da predição no conjunto de dados de validação. Assim, um modelo aceitável deve apresentar uma prestação razoavelmente boa em ambas as situações. Ainda de acordo com este autor, por vezes a seriação de vários tipos de modelos só é possível com recurso à validação, dado que as estatísticas de ajustamento e os gráficos de resíduos produzidos nem sempre são comparáveis para a selecção do melhor modelo.

A validação auxilia o analista na decisão sobre se o modelo simula o crescimento em altura dominante das árvores adequadamente na região de interesse. No entanto, o objectivo do processo de validação não é estabelecer a verdade ou falsidade absolutas, mas determinar se o modelo pode ser útil para determinado propósito

(Reynolds *et al.*, 1981). É um procedimento útil que dá ao analista e ao utilizador confiança nos seus modelos. Contudo os resultados dos testes para o enviesamento e precisão devem ser interpretados cautelosamente, pois são o reflexo dos dados dos quais derivam (Nigh e Sit, 1996).

A validação pode revelar que o modelo é verdadeiramente enviesado. Uma fonte de enviesamento pode ser a escolha da forma funcional do modelo que não será a mais adequada (Nigh e Sit, 1996). Duas características importantes das curvas de classe de qualidade que são determinadas, pelo menos em parte, pela forma funcional usada para ajustar as curvas, são a elasticidade do crescimento em altura (mudança em percentagem da altura dominante com uma variação de 1% na idade) e a convergência assintótica (Nanang e Nunifu, 1999).

Uma vez que a qualidade do ajustamento do modelo não reflecte necessariamente a qualidade das predições, é desejável confrontar o modelo seleccionado com um conjunto de dados de validação antes da sua aplicação ser posta em prática. Se as estatísticas de predição dos dados de validação forem muito diferentes das estatísticas obtidas a partir dos dados de ajustamento do modelo, ou se rejeita o modelo ou, como Neter *et al.* (1990) sugerem, se confia nas estatísticas de predição, em vez das estatísticas de ajustamento, como uma indicação da forma como o modelo se comportará em futuras aplicações.

Por outro lado, mesmo que a rotina da validação mostre que o modelo não é enviesado e que possui estimativas do erro aceitáveis, o seu uso extensivo pode ainda provar que ele será insatisfatório (Nigh e Sit, 1996). A validação final de qualquer modelo é o uso dos modelos pelos técnicos e é, portanto, um processo de aceitação a longo prazo.

#### **2.1.4.2. Tipos de dados para validação de modelos**

A validação de um modelo pode ser feita recorrendo a dados provenientes de parcelas permanentes da mesma espécie e da mesma região que os dados utilizados no ajustamento do modelo. Esta, é sem dúvida a melhor forma de validar um modelo, encontrando-se raramente dados disponíveis deste tipo para este propósito.

Pode recorrer-se também à partição aleatória do ficheiro de dados original (validação cruzada). No entanto, o método preferido de validação será sempre o uso de um conjunto de novos dados obtidos para o efeito (Kozak e Kozak, 2003). Estes autores salientam, contudo, que se os novos dados são retirados da mesma população usada para

a construção do modelo, é provável que se comportem da mesma maneira, como se de uma validação cruzada se tratasse.

Os dados a utilizar podem provir da medição de parcelas de estudo, no entanto, quando a espécie em causa, como é o caso do castanheiro de alto fuste em Portugal, ocupa uma área relativamente reduzida, é praticamente impossível utilizar um conjunto de dados de validação completamente independente do utilizado no ajustamento.

A componente económica, os meios disponíveis e a área ocupada pela espécie condicionam o tipo de dados para validação.

### **2.1.4.3. Estatísticas e outros métodos usados na validação**

A validação de um modelo de regressão pode ser feita seguindo três tipos de procedimentos (Montgomery e Peck, 1982):

- Análise dos coeficientes do modelo e dos valores preditos – os coeficientes do modelo de regressão final são estudados para avaliar se a sua estabilidade, sinais e magnitude, são razoáveis. Este procedimento é muitas vezes designado por validação qualitativa.

- Utilização de um conjunto de dados independente dos utilizados no processo de ajustamento, com vista à análise da capacidade preditiva do modelo – constitui o método mais eficaz e consiste em comparar directamente as predições obtidas com o modelo, com os novos dados. O uso de dados reais no processo de validação, independentes dos dados usados para a sua construção e calibração, aumenta a confiança nas conclusões obtidas acerca do modelo (Reynolds *et al.*, 1981).

- Partição aleatória do conjunto original de dados, uma parte para ajustamento, a outra para validação, ou seja, investigação da capacidade preditiva do modelo. Este processo é designado muitas vezes por validação cruzada. Utiliza-se quando se possui um volume de dados considerável e não é possível obter um conjunto de observações independente para validação. Pode também utilizar-se a validação cruzada múltipla, a qual é tida como uma versão melhorada do processo anterior, na qual o número total de observações,  $n$ , é dividido em  $k$  subconjuntos iguais, em que um subconjunto de  $n(k-1)/k$  dados é usado para a construção do modelo, enquanto que o subconjunto de  $n/k$  dados é usado para validação. Este procedimento é repetido  $k$  vezes e, por isso, cada subconjunto é usado para validação enquanto que o resto dos dados é usado para a construção do modelo. Note-se, contudo, que a condição de  $(k-1)/k \geq 0,5$  deve ser considerada. Quando ( $k = n$ ) cada iteração do modelo é derivada de  $(n-1)$  observações, e

o conjunto de validação possui apenas uma observação. Este caso especial de dupla validação cruzada resulta, segundo Stone (1974), Picard e Cook (1984), Shao (1993), na estatística *PRESS* (soma de quadrados de predição). Os resíduos *PRESS* dão a indicação acerca da capacidade preditiva de uma função por validação cruzada (Myers, 1986).

A partição dos dados pode ser feita de variadíssimas formas, considerando-se como mais adequada a que proporcione conjuntos de dados aleatórios o mais independentes possível, tendo em conta a estrutura dos dados a utilizar. O modelo finalmente adoptado deve ser ajustado usando a totalidade dos dados, fazendo uso de toda a informação (Myers, 1986).

Montgomery e Peck (1982) consideram, igualmente, a estatística *PRESS* como uma forma de validação cruzada. O cálculo dos resíduos *PRESS* é equivalente a um procedimento que começa por omitir uma observação nos dados, ajustando o modelo às restantes  $(n-1)$  observações, predizendo a resposta para a observação omitida e comparando a predição com o valor observado, obtendo o resíduo *PRESS* para a observação  $i$ :  $y_i - \hat{y}_{i,-i} = e_{i,-i} (i = 1, 2, \dots, n)$ .

Após a estimação dos parâmetros a primeira observação é reintroduzida e a segunda observação omitida, após o que se procede de novo à estimação dos parâmetros. Omite-se uma vez cada observação, e assim o modelo candidato é ajustado  $n$  vezes, resultando em consequência  $n$  erros de predição ou resíduos *PRESS*. Desta forma a observação  $y_i$  não é usada em simultâneo para o ajustamento do modelo e para a avaliação do mesmo, constituindo um verdadeiro teste de validação (Meyer, 1986). A estatística *PRESS* é definida como a soma de quadrados dos  $n$  resíduos *PRESS*:

$$PRESS = \sum_{i=1}^n e_{(i,-i)}^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{(i,-i)})^2$$

Assim, a estatística *PRESS* utiliza cada subconjunto de  $(n-1)$  observações como conjuntos de dados de ajustamento, e por sua vez, cada observação para formar o conjunto de dados de predição. Podem calcular-se muitas outras estatísticas com os resíduos *PRESS*, sendo as mais usuais:

- A média dos resíduos de predição (*mPRESS*),

$$mPRESS = \sum_{i=1}^n \frac{e_{(i,-i)}}{n}$$

- A média do valor absoluto dos resíduos de predição (*maPRESS*)

$$maPRESS = \sum_{i=1}^n \frac{|e_{(i,-i)}|}{n}$$

- O  $R^2$  de predição ( $R^2_{pred}$ )

$$R^2_{pred} = 1 - \frac{PRESS}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \text{ varia teoricamente entre } 1 \text{ e } -\infty.$$

Ao utilizar-se a estatística *PRESS* na comparação de modelos convém ter presente que esta não contabiliza o efeito da utilização de um número diferente de variáveis independentes nos modelos. Assim, Draper e Smith (1981) sugerem que ao comparar modelos com base nesta estatística se selecione aquele que apresente menor número de variáveis quando os ganhos em predição forem comparativamente pequenos, relativamente a modelos com mais variáveis.

Kozak e Kozak (2003) consideram a utilização prática das técnicas de validação cruzada bastante questionável apesar da sua capacidade para o cálculo de erros de predição independentes dos dados usados para o seu desenvolvimento. Segundo estes autores, as técnicas de validação cruzada e validação cruzada múltipla não acrescentam nenhuma informação adicional, quando comparada com as estatísticas respectivas obtidas directamente com a construção do modelo a partir do conjunto total de dados.

Apesar dos vários métodos disponíveis para a validação dos modelos, existem ainda muitos problemas com esses métodos devido à falta de independência dos dados e à heterocedasticidade do erro ao longo da série de idades (Nigh e Sit, 1996).

Segundo Huang (1997), a forma mais fácil de validar um modelo é calcular os resíduos *PRESS* ou ajustar  $y_{observado} = \beta_0 + \beta_1 y_{estimado}$  e testar se  $\beta_0 = 0$  e  $\beta_1 = 1$ . Este procedimento pode ser usado para verificar se o erro de aplicação do modelo a um conjunto de dados diferente do ajustamento é significativo. Se as predições forem muito diferentes das correspondentes observações, então ou a ordenada na origem deste modelo  $\beta_0$  é diferente de zero ou o declive  $\beta_1$  é diferente de 1, por isso a hipótese nula  $\beta_0 = 0$  e  $\beta_1 = 1$  será rejeitada e os erros de aplicação do modelo a esses dados serão significativos. Para tal, é necessário fazer um teste aos coeficientes  $\beta_0$  e  $\beta_1$  (Huang *et al.*, 2000).

Segundo Huang (1997), os gráficos e estatísticas obtidos em diferentes processos de validação providenciam a base para a determinação do desempenho do modelo no conjunto de dados de validação não respondendo, contudo, a questões como

se, e onde, as predições caem dentro das expectativas dos utilizadores, ou estão dentro de limites aceitáveis.

Através da medição de parcelas de amostragem após alguns anos de crescimento, é também possível verificar se a altura dominante se desenvolve da forma indicada pelo modelo de crescimento em altura dominante (Teshome e Petty, 2000), o que constitui uma forma de validação.

O cálculo de médias e médias dos valores absolutos de resíduos *PRESS* ou de predição em função de variáveis do povoamento por classe de qualidade, de altura dominante, de idade, entre outros, constitui igualmente um processo de validação. Este procedimento permite identificar a classe ou classes de determinada variável onde o modelo apresenta melhor e pior desempenho, ou seja, maior ou menor enviesamento das predições relativamente aos valores observados ou maior ou menor precisão.

Dado que a série de idades para a qual os modelos são válidos é particularmente duvidosa, a validação dos modelos poderá responder a inúmeras questões que possam surgir relativamente à sua aplicabilidade.

## 2.2. METODOLOGIA

### 2.2.1. Dados

Os povoamentos adultos de alto fuste de castanheiro que foram alvo de estudo para a modelação do crescimento em altura dominante e elaboração de curvas de classe de qualidade situam-se nas Serras de Bornes, Marão e Padrela. Como já foi referido no Capítulo I, correspondem praticamente à totalidade dos povoamentos adultos conhecidos ocupados por esta espécie, neste regime, em Trás-os-Montes e Entre Douro e Minho.

Para a modelação da altura dominante e a construção das curvas de classe de qualidade foram utilizados dados de análise do tronco de 33 árvores abatidas nos povoamentos de alto fuste adulto de Bornes, Marão e Padrela, já referidos. As árvores utilizadas não correspondem à totalidade das árvores abatidas, mas somente às dominantes ou codominantes no momento do abate. Dada a pequena dimensão dos povoamentos, estes foram quase sempre amostrados na totalidade. No caso da Padrela (povoamento C), cuja área total é de 2,9 ha, a que corresponde uma área efectiva ocupada com castanheiro de aproximadamente 2,5 ha, foram amostradas todas as árvores. Em Bornes, com uma área efectivamente ocupada pelo alto fuste de 0,6 ha, foi

amostrada a totalidade dessa área, excluindo-se a talhadia da parte superior do povoamento. O povoamento do Marão com uma área amostrada da totalidade das árvores situadas na margem direita da Ribeira da Póvoa correspondente a uma área efectiva de  $0,5 \text{ ha}$ , aproximadamente, e apenas uma parcela de  $500 \text{ m}^2$  na margem esquerda que possui uma área total de  $0,4 \text{ ha}$ .

Assim, feita a mapificação das árvores a partir das coordenadas rectangulares, calculadas a partir das coordenadas polares de cada árvore relativamente a um ponto de referência, enquadrou-se essa distribuição das árvores no terreno num sistema de eixos de coordenadas. Na Figura 2.1 é apresentada, como exemplo, a distribuição das árvores do povoamento *C* com maior dimensão, localizado na serra da Padrela.

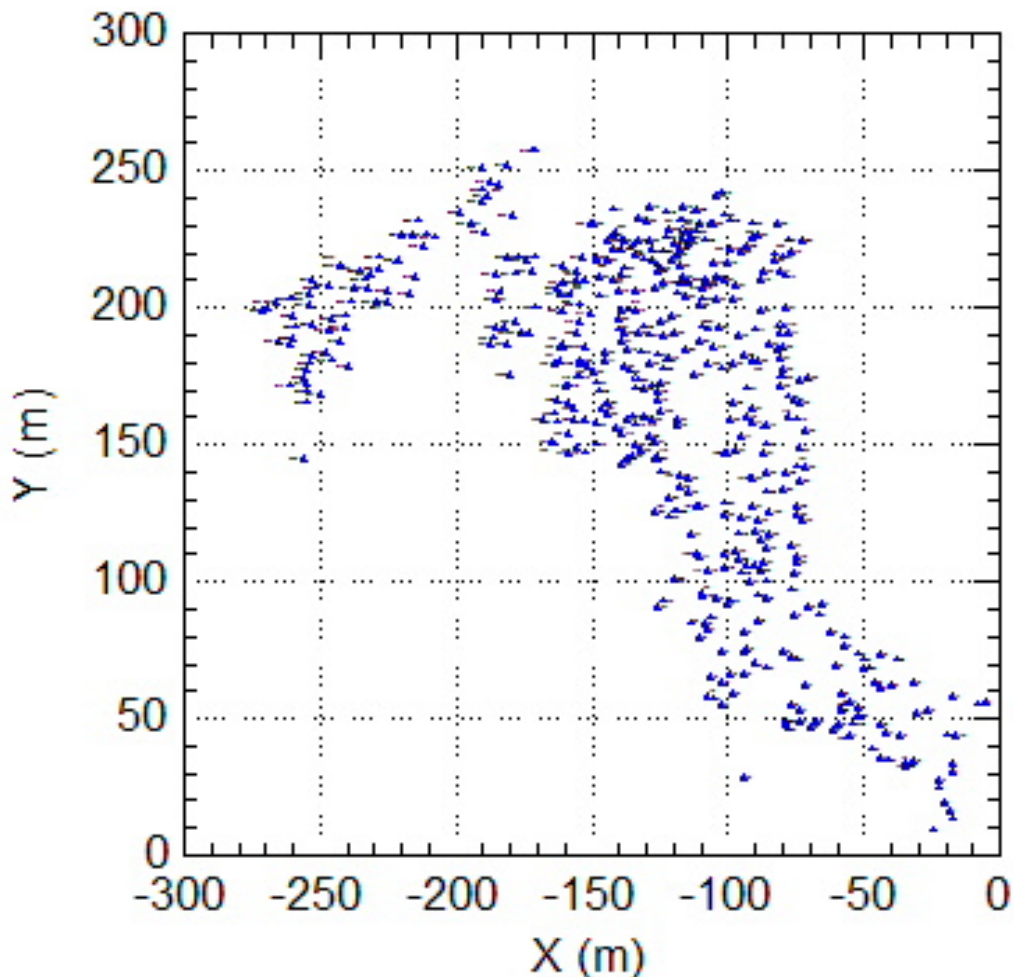


Figura 2.1: Distribuição das árvores no povoamento *C* da Padrela (Vale do Carro).

Com recurso a este sistema de eixos, dividiram-se os povoamentos em diversas parcelas mais pequenas, de acordo com figuras geométricas conhecidas, de forma a

poder definir-se não uma altura dominante global para o povoamento, mas diferentes alturas dominantes, de acordo com o estado de desenvolvimento próprio de cada parcela, dado que os povoamentos não são homogêneos em termos de desenvolvimento e produtividade da estação. Assim, a altura dominante foi calculada de acordo com a média das alturas das 100 árvores mais grossas por hectare, o que corresponde a uma árvore por cada  $100 m^2$ . Foram construídas curvas (altura, idade) individuais para cada árvore abatida no sentido de detectar sinais de competição que pudessem causar padrões de crescimento em altura dominante anormais. Das 34 árvores abatidas para determinação da biomassa, foram utilizadas 28 para o desenvolvimento das curvas de classe de qualidade e excluídas 6 por não pertencerem ao estrato superior das dominantes ou codominantes, relativamente às vizinhas da parcela onde foram abatidas. Às 28 árvores seleccionadas foram adicionadas mais 4 árvores dominantes (1 da Padrela, 2 do Marão e 1 de Bornes) abatidas em períodos anteriores, mais uma árvore dominante abatida na actualidade, na proximidade da parcela de estudo, no povoamento B, na Padrela. O ficheiro final de dados é composto por 6 árvores de Bornes, 10 árvores do Marão e 17 árvores da Padrela, o que perfaz as 33 árvores no total. Na Figura 2.2 apresentam-se as curvas (altura dominante, idade) correspondentes às 33 árvores utilizadas para a modelação do crescimento em altura dominante e definição de classes de qualidade. As características das árvores abatidas referentes às variáveis dendrométricas utilizadas para este estudo encontram-se no Quadro 2.2.

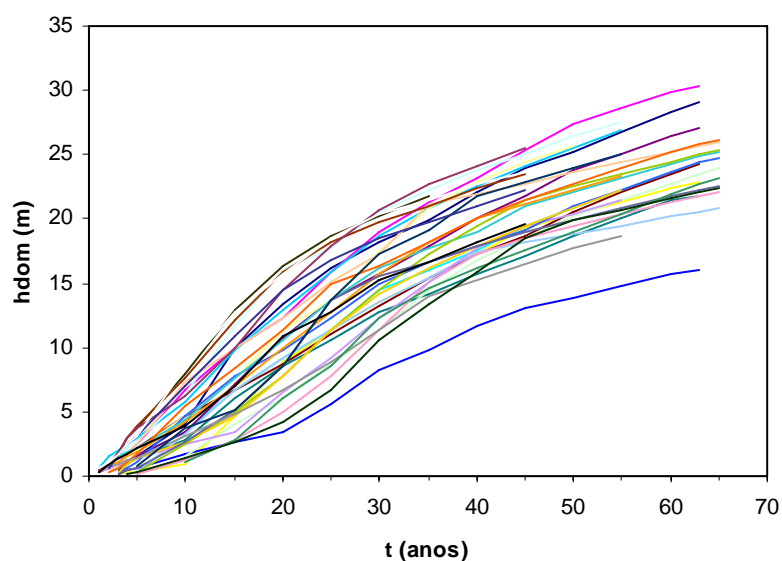


Figura 2.2: Desenvolvimento da altura com a idade das árvores dominantes abatidas.

Quadro 2.2: Características dos dados disponíveis para a modelação da altura dominante e construção das curvas de classes de qualidade.

Variáveis	Bornes	Marão	Padrela	Tot. Locais
Nº árvores abatidas	6	10	17	33
Nº pares ( $h_{dom}$ , t)	259	603	1003	1865
Idade **	45	63	65	65*
$h_{dom}^{***}$ - média	13,99	14,58	13,75	14,05
$h_{dom}^{***}$ - mínimo	0,33	0,13	0,17	0,13
$h_{dom}^{***}$ - máximo	25,48	30,40	26,18	30,40
$h_{dom}^{***}$ - desvio padrão	7,10	8,16	7,57	7,71

\* idade máxima; \*\* idade em anos; \*\*\* altura dominante (m)

### 2.2.1.1. Método de análise do tronco

As árvores abatidas foram seccionadas a alturas que variaram dos 3 aos 24 cm acima do nível do solo, dependendo das condições topográficas do terreno, a 1,30 m de altura e a partir deste nível de 2,25 m em 2,25 m, até à despona de 7 cm. Em todos os níveis, incluindo a base, foram retiradas 2 rodela com aproximadamente 5 cm de espessura. Uma das duas rodela de cada nível foi utilizada para a determinação da biomassa, a outra para a medição dos crescimentos através do método de análise do tronco. As rodela foram marcadas na parte inferior com o local e número da árvore a que pertenciam e o respectivo nível. O diâmetro destas rodela foi marcado e medido no campo, com uma régua, segundo duas direcções concorrentes *N-S* e *E-W*, com e sem casca, de acordo com a marcação prévia definitiva efectuada na árvore em pé, após o que foram pesadas e acondicionadas para serem transportadas para o Laboratório. Uma vez no Laboratório as rodela foram polidas, e posteriormente, efectuada a respectiva contagem dos anéis de crescimento, com auxílio de uma lupa de investigação com iluminação e uma lupa de mão, ao longo dos diâmetros que foram marcados logo após o seccionamento do tronco, procurando detectar a presença de falsos anéis. O crescimento do último ano foi eliminado uma vez que não se encontrava completo devido ao corte das árvores ter ocorrido durante o período vegetativo. Após esta operação seguiu-se a divisão em quinquénios, partindo da periferia para o centro da rodela. A medição dos crescimentos em diâmetro, por quinquénios, ao longo dos raios, nas duas direcções consideradas, foi efectuada a partir da medula para a periferia e os respectivos valores assinalados em fichas próprias para o efeito.

Dado o elevado número de amostras para tratar, nomeadamente a determinação da biomassa das amostras recolhidas nestas árvores abatidas, não nos foi possível proceder de imediato a esta medição, pelo que mais tarde tivemos que efectuar uma

correção para o crescimento radial. A correção aplicada teve por base a diferença entre o valor da medição do diâmetro, nas duas direções consideradas, no momento da análise das rodela e a mesma medição efectuada no campo, logo a seguir ao abate. A correção encontrada foi aplicada à medição de cada quinquénio considerado. O crescimento final, em diâmetro, obtido para cada nível, resulta da média das duas medições efectuadas segundo as direcções  $N - S$  e  $E - W$ , em cada rodela.

Uma vez que a toragem do tronco foi efectuada segundo comprimentos pré-determinados (que nem sempre coincidem com o verticilo, ficando na maioria dos casos algures na zona intermédia do lançamento anual), a altura nas idades a que correspondem os seccionamentos será subestimada. Por esta razão, foi necessário proceder a um ajustamento para corrigir o desvio na estimativa da altura em cada secção de corte. Para tal existem vários algoritmos que permitem estimar a verdadeira altura da árvore numa determinada idade. Dyer e Bailey (1987) após terem comparado seis desses algoritmos na estimação das alturas, recomendam o método de interpolação de Carmean (1972) por proporcionar resultados mais exactos, com alturas estimadas que não diferem da verdadeira altura, e maior facilidade de aplicação. Segundo estes autores o método baseia-se em dois pressupostos, ou seja: (i) assume que o crescimento anual em altura é constante para cada ano ficando completa ou parcialmente contido entre cada duas secções; (ii) assume também que, em média, um seccionamento ocorrerá no meio de um lançamento anual. Newberry (1991) sugere alargar esta correção ao lançamento terminal.

Fabbio *et al.* (1994) ao compararem a aplicação do designado método de Carmean com um método por eles proposto (denominado método *ISSA*) para a estimação das alturas em *Pinus nigra*, considerando três frequências de amostragem (toros de 0,5, 1 e 2 m), concluem que o método de Carmean (1972) é o que produz estimativas mais precisas quando a toragem é feita de 2 em 2 metros. Por sua vez o método *ISSA* garante uma maior precisão quando se consideram maiores intensidades de amostragem.

Assim, uma vez que os comprimentos dos toros utilizados neste trabalho são na generalidade dos casos de 2,25 m, as alturas para todas as idades foram estimadas pelo método de Carmean (1972) como recomendam Dyer e Bailey (1987). Este tipo de procedimento foi também utilizado por Marques (1987, 1991), Ker e Bowling (1991), Magnussen e Penner (1996), Meng *et al.* (1997), Chen *et al.* (1998), Goelz e Burk (1998), entre muitos outros. Contudo, o uso do método de Carmean levou-nos a pôr a

hipótese, que se viria a confirmar posteriormente, da estrutura de dados se encontrar muito correlacionada pelo facto de considerar o crescimento em altura constante entre duas secções.

### **2.2.2. Ajustamento das funções para predição do crescimento em altura dominante e índice de qualidade da estação (curvas de classe de qualidade)**

A selecção de um sistema de curvas de classe de qualidade depende não só da função de crescimento mas, sobretudo da forma da função utilizada e da metodologia de ajustamento. Para a determinação do índice de qualidade da estação considerou-se como idade padrão a idade de 45 anos, não só porque é uma idade próxima da revolução preconizada para o castanheiro de alto fuste, que segundo o modelo de gestão adaptado de Bourgeois (1992) por Monteiro e Patrício (1997) é de 45 a 50 anos, mas também porque corresponde à menor idade dos três povoamentos em estudo, não sendo por isso necessário recorrer a interpolações para a obtenção dos dados. Pelo que podemos observar nos povoamentos mais velhos, com idades de 63 a 65 anos, poderemos dizer que a revolução para produção de madeira não deve exceder em muito os 50 anos, uma vez que a partir desta data se verifica uma diminuição progressiva da qualidade produzida, principalmente em povoamentos não conduzidos ou conduzidos muito tardiamente, devido às podridões do tronco que ocorrem sobretudo nas proximidades de feridas, ramos secos ou corte de ramos de grandes dimensões. Bourgeois (1992) considera que a vida produtiva do castanheiro pode atingir os 150 anos em pomar e os 70 anos em povoamento, embora o limite biológico da espécie se situe à volta dos 1000 anos.

Não são conhecidas curvas de classe de qualidade para o castanheiro nas regiões em estudo. Páscoa (1987b) apresenta curvas de classe de qualidade para o castanheiro na Beira Interior, construídas para uma idade padrão de 60 anos com um número de observações muito restrito ( $n = 16$ ), provenientes em parte de parcelas temporárias. A informação bibliográfica disponível sobre esta matéria, concretamente para o castanheiro, é escassa. Na pesquisa bibliográfica efectuada, que incluiu as revistas mais prestigiadas em termos de ciência florestal, não foram encontradas quaisquer referências sobre esta matéria no que diz respeito ao alto fuste, pelo que a comparação dos nossos resultados com outros estudos é bastante difícil. As referências encontradas, ainda que poucas, dizem respeito essencialmente a curvas de classe de qualidade para talhadia de

castanheiro, das quais se salienta Bourgeois (1992), e para o “alto fuste” com origem em talhadia (Everard e Christie, 1995).

### **2.2.2.1. Selecção de um método de construção das curvas de classe de qualidade**

O método de construção utilizado para a obtenção das curvas de classe de qualidade foi o método das equações às diferenças porque pode ser utilizado com dados obtidos pelo método de análise do tronco e é recomendado por Clutter *et al.* (1983) quando existem dados de pelo menos duas medições consecutivas na mesma parcela ou árvore. Além do mais tem a vantagem de poder ser utilizado quando os povoamentos amostrados têm uma idade inferior à idade padrão (Stansfield *et al.*, 1991). No nosso caso, um dos povoamentos, concretamente o de Bornes, tem uma idade igual à idade padrão considerada (45 anos).

De acordo com Clutter *et al.* (1983), o procedimento deste método é bastante flexível e pode ser aplicado com qualquer equação da altura dominante em função da idade para produzir curvas anamórficas ou polimórficas. O primeiro passo na aplicação deste método é o desenvolvimento de uma forma às diferenças da equação altura-idade a ser ajustada. As equações às diferenças expressam a altura dominante no momento da medição ( $h_{dom_2}$ ) em função da idade no momento da medição ( $t_2$ ), da idade no momento da medição inicial ( $t_1$ ) e da altura dominante também no momento da medição inicial ( $h_{dom_1}$ ).

O método das equações às diferenças é o que melhor se adequa à modelação dinâmica do crescimento em altura dominante. Tem a vantagem de produzir equações invariantes com a idade padrão e de permitir obter modelos de crescimento em altura dominante e de índice de qualidade da estação compatíveis. As equações dinâmicas são apropriadas para dois usos das curvas de classes de qualidade: primeiro, para estimar a altura dominante ou produção futura (ou passada) de um povoamento e segundo para estimar o índice de qualidade da estação – independentemente do povoamento corrente e da sua gestão (Cieszewski, 2002).

As equações às diferenças são equações recursivas para as quais os pressupostos da regressão são violados devido ao facto das variáveis explanatórias não serem medidas sem erro (Seber e Wild, 1989). Este método utiliza equações dinâmicas invariantes com a idade padrão que, segundo Cieszewski (2002), são superiores em desempenho e propriedades às equações análogas com idade padrão fixa. A verdadeira invariância das funções com a idade padrão constitui a principal vantagem das equações

às diferenças, ou equações dinâmicas, as quais são a forma mais moderna e avançada das funções básicas integrais das classes de qualidade usadas na biometria florestal (Cieszewski e Bailey, 2000).

#### 2.2.2.2. Estrutura dos dados

A aplicação do método das equações às diferenças pressupõe a utilização de pares (altura dominante, idade). Utilizaram-se duas estruturas de dados para a estimação dos parâmetros das equações às diferenças: intervalos de crescimento sem sobreposição e todos os intervalos possíveis considerando, numa primeira análise, as observações das alturas por períodos de um ano (estruturas de dados III e VI, respectivamente, apresentadas no ponto 2.1.3.2.2.). No total, foram gerados 1 832 e 101 592 pares (altura dominante, idade), respectivamente. Posteriormente, detectou-se uma forte correlação demonstrada nos gráficos dos resíduos studentizados *vs.* valores estimados. Perante esta situação ensaiaram-se vários procedimentos. Assim, começou-se por considerar apenas a primeira observação da altura dominante, para cada secção de corte, estimada pelo método de Carmean. Este procedimento não evidenciou correlação dentro da mesma árvore mas demonstrou correlação por nível. De entre as várias possibilidades testadas para resolver este problema, nomeadamente, as observações da altura dominante por quinquénios e por triénios, ambas demonstraram bons resultados em termos da diminuição da correlação evidenciada nos gráficos de resíduos studentizados. No final optou-se por uma organização de dados trienal uma vez que esta originou um maior número de observações, permitindo ainda considerar um ficheiro independente para validação. Desta forma foram considerados na análise as duas estruturas de dados já mencionadas, aplicadas às observações trienais, tendo sido obtidos 600 e 11 728 pares de valores (altura dominante, idade), respectivamente. A caracterização dos dados organizados por triénios é apresentada no Quadro 2.3.

Quadro 2.3: Características dos dados usados para a modelação da altura dominante e construção das curvas de classes de qualidade, com observações trienais.

Variáveis	Bornes	Marão	Padrela	Tot. Locais
Nº árvores abatidas	6	10	17	33
Nº pares ( $h_{dom}$ , t)	87	205	341	633
Idade**	45	63	65	65*
$h_{dom}^{***}$ - média	14,40	14,66	13,88	14,20
$h_{dom}^{***}$ - mínimo	0,98	0,20	0,18	0,18
$h_{dom}^{***}$ - máximo	25,48	30,40	26,18	30,40
$h_{dom}^{***}$ - desvio padrão	7,01	8,23	7,65	7,76

\* idade máxima; \*\* idade em anos; \*\*\* altura dominante (m)

O uso das duas estruturas de dados deveu-se ao facto dos estudos mencionados na bibliografia não demonstrarem claramente, quer de um modo geral, quer particularmente para o castanheiro, qual a estrutura de dados mais adequada para o ajustamento das curvas de classe de qualidade pelo método das equações às diferenças.

Assim, por exemplo, Borders *et al.* (1987) encontraram diferenças modestas entre as três estruturas de dados utilizadas para a estimação dos parâmetros das equações às diferenças: máximo intervalo de tempo observado, todos os intervalos possíveis e diferenças sem sobreposição. Huang e Titus (1995) também não chegaram a uma conclusão evidente sobre o assunto. Por sua vez, Huang (1997), comparando diferentes estruturas de dados, conclui que em geral a estrutura com todos os intervalos possíveis proporciona os resultados mais estáveis e consistentes. Goelz e Burk (1992) consideraram como melhor estrutura de dados todos os intervalos possíveis. Por sua vez, Amaro *et al.* (1998) obtêm valores preditos similares com estruturas de dados com todos os intervalos possíveis e com intervalos sem sobreposição, verificando contudo um ligeiro aumento da precisão com este último, em muitos casos.

Em termos gerais, segundo a bibliografia, a utilização de intervalos sem sobreposição evita alguns problemas estatísticos, nomeadamente a correlação dos erros devidos à idade mas continua a haver correlação dentro da mesma árvore. Por outro lado, com o recurso à utilização de todos os intervalos possíveis o que se pretende é obter estimadores centrados e eficientes dos coeficientes. A capacidade preditiva do modelo final parece ser pouco afectada pelo uso de uma ou de outra estrutura de dados, mas é importante considerar as implicações estatísticas quando faz parte dos objectivos da construção do modelo testar hipóteses sobre os parâmetros (Amaro *et al.*, 1998), uma vez que a variância dos estimadores quando se usam todos os intervalos possíveis fica enviesada, resultando em intervalos de confiança muito estreitos. Neste tipo de estrutura de dados o número de observações está inflacionado artificialmente e em consequência os erros padrões dos parâmetros são demasiado pequenos. Goelz e Burk (1996) sugerem um método para correcção deste problema que consiste na expansão do erro padrão através do seguinte factor de correcção:

$$f_{\text{correcção}} = \sqrt{\frac{N(\text{tip})}{N(\text{iss})}}, \quad \text{com } N(\text{tip}) = \left( \sum_{i=1}^k n_i(n_i - 1) \right) \quad \text{e} \quad N(\text{iss}) = \left( \sum_{i=1}^k n_i \right)$$

onde,  $N(\text{tip})$  é o número de observações com todos os intervalos possíveis,  $N(\text{iss})$  é o número de observações com intervalos sem sobreposição,  $k$  representa o número de árvores e  $n_i$  o número de medições na árvore  $i$ .

### 2.2.2.3. Selecção de um modelo

Para a modelação do crescimento em altura dominante foram testados uma série de modelos em diferentes formas, não tendo convergido alguns deles devido à sua complexidade. Os modelos testados que apresentaram melhor prestação encontram-se no Quadro 2.4. A utilização de equações com formas apropriadas, capazes de reproduzir padrões de tendência dos dados fundamentais, constitui o factor mais importante que afecta o ajustamento de uma equação aos dados e minimiza o quadrado dos resíduos, independentemente da técnica de ajustamento seleccionada (Cieszewski, 2002).

Quadro 2.4: Funções de crescimento testadas e respectivas equações às diferenças

Função	Parâmetro livre	Código Função	Equação às diferenças
Lundqvist-Korf $y = Ae^{-\frac{k}{t^n}}$	k	LK <sub>1</sub>	$y_2 = A \left( \frac{y_1}{A} \right)^{\left( \frac{t_1}{t_2} \right)^n}$
	A	LK <sub>2</sub>	$y_2 = y_1 e^{k \left( \frac{1}{t_1^n} - \frac{1}{t_2^n} \right)}$
Chapman-Richards $y = A(1 - e^{-kt})^{\frac{1}{1-m}}$	k	CR <sub>1</sub>	$y_2 = A \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{y_1}{A} \right)^{1-m} \right]^{\frac{t_1}{t_2}} \right\}^{\frac{1}{1-m}}$
	A	CR <sub>2</sub>	$y_2 = y_1 \left( \frac{1 - e^{-kt_2}}{1 - e^{-kt_1}} \right)^{\frac{1}{1-m}}$
	m	CR <sub>3</sub>	$y_2 = A^{\frac{1 - \ln(1 - e^{-kt_2})}{\ln(1 - e^{-km})}} y_1^{\frac{\ln(1 - e^{-kt_2})}{\ln(1 - e^{-km})}}$
McDill-Amateis	-	MA	$y_2 = \frac{A}{1 - \left( 1 - \frac{A}{y_1} \right) \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^n}$
Amateis-Burkhart		AB	$y_2 = e^{\left( \ln y_1 \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^k e^{\theta \left( \frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} \right)} \right)}$

As funções candidatas podem ser consideradas modelos não lineares onde  $y_2$  descreve a variável dependente (altura dominante) no momento  $t_2$ , em função das variáveis independentes altura dominante ( $y_1$ ) e idade ( $t_1$ ) no momento  $um$  e da idade ( $t_2$ ). Todas estas funções têm a propriedade de fornecer predições invariantes com o

intervalo de projecção. Esta propriedade assegura que as projecções sobre o mesmo período de tempo sejam equivalentes, apesar do número ou da extensão dos intervalos de projecção usados (Amaro *et al.*, 1998).

Dadas as diferentes estruturas de dados consideradas, o processo de selecção de um modelo de crescimento em altura dominante foi sequencial. Assim, numa primeira abordagem, ajustaram-se os sete modelos de equações às diferenças, com intervalos de crescimento sem sobreposição, recorrendo ao método dos mínimos quadrados não lineares (*OLS*) com base no método iterativo de Gauss-Newton dos mínimos quadrados. O ajustamento foi efectuado primeiramente no *Systat*, utilizando vários modelos não lineares pelo método dos mínimos quadrados, por ser mais fácil testar os valores iniciais. Os valores dos parâmetros dos modelos que apresentaram melhor qualidade do ajustamento, foram posteriormente utilizados como valores iniciais para a estimação dos coeficientes destas funções, usando o procedimento *PROC NLIN* do programa *Statistical Analysis System (SAS)* com vista ao cálculo de estatísticas como os resíduos *PRESS* e studentizados.

Esta primeira avaliação dos modelos foi feita com base nos seguintes critérios:

- Ajustamento de cada uma das funções aos dados com vista à identificação da equação que minimiza a soma de quadrados dos resíduos (*SQR*) e simultaneamente apresenta maior eficiência de modelação (*EM*) e menor quadrado médio dos resíduos (*QMR*). O enviesamento e a variância podem ser combinados numa única estatística, o erro quadrado médio ( $QMR = \text{enviesamento} + \text{variância}$ ) o qual providencia uma medida da exactidão do modelo e é um indicador do ajustamento global (McNab, 2002). O *QMR* dá indicação da variância residual, enquanto a eficiência de modelação (*EM*) é interpretada como uma medida da proporção da variância total que é explicada pelo modelo. Pode ser calculada da seguinte forma:

$$EM = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

onde:  $y$  é a variável dependente observada;  $\hat{y}$ , é o valor estimado da variável dependente;  $\bar{y}$ , é a média dos valores observados da variável dependente. A eficiência de modelação deve tomar valores entre zero e um. Um valor igual a *um* expressa um ajustamento perfeito enquanto um valor igual a *zero* demonstra que o conjunto das estimativas não difere significativamente da média da variável dependente.

Simultaneamente, testou-se se os coeficientes eram iguais a zero, observando se os intervalos assintóticos de confiança dos coeficientes, ao nível de 95 %, continham o valor zero.

- Procedeu-se à análise gráfica dos resíduos para verificação dos pressupostos da regressão. Um pressuposto fundamental dos mínimos quadrados não lineares é que o termo do erro seja normal, independente e identicamente distribuído, com média zero e variância constante (Montgomery e Peck, 1982). No entanto, como já foi referido anteriormente, as equações às diferenças são equações recursivas que violam os pressupostos da regressão pelo facto das variáveis explanatórias serem medidas com erro, implicando que estas não são independentes do erro, originando estimadores dos mínimos quadrados ordinários viesados e inconsistentes. Além disso, as medições sucessivas na mesma árvore amostra não são independentes (Curtis, 1964), possuindo, por isso, autocorrelação dentro de cada árvore.

Quando os erros estão correlacionados, a estimativa dos parâmetros do modelo por *OLS* permanece teoricamente não viesada, mas a estimativa será menos eficiente e a estimativa da variância dos parâmetros será viesada, resultando em intervalos de confiança muito estreitos (Draper e Smith, 1981). Se a estimativa da variância dos parâmetros não for necessária, então *OLS* pode ser uma aproximação muito útil para a calibração dos modelos (Swindel, 1968).

Uma outra metodologia é o recurso ao método dos mínimos quadrados não lineares generalizados “*generalised nonlinear least squares*” *GNLS*, que na sua essência transforma os dados originais de modo a garantir que o termo do erro seja independente e identicamente distribuído, com variância comum (Huang, 1997). No entanto, autores como Lappi e Bailey (1988), McDill e Amateis (1992), entre outros, julgam ser apropriada a aplicação de *OLS* para grandes amostras mesmo que se possam usar procedimentos de *GLS* ou *GNLS*.

Numa segunda fase, após a análise gráfica dos resíduos evidenciar anomalias nos pressupostos da regressão, recorreu-se à sua reparametrização, através de regressão ponderada, com um novo cálculo das estatísticas de ajustamento consideradas no ponto anterior. Desta forma, a presença de não normalidade foi ultrapassada usando regressão robusta baseada no método dos mínimos quadrados ponderados iterativamente (*IRWLS*) com recurso à função de Huber.

Existem vários métodos robustos para estimação de parâmetros baseados na determinação de um estimador, associado a uma função influência  $\psi$ , escolhida de

modo a reduzir o peso dos pontos que aparentam ser “outliers”. Um exemplo é a função influência de Huber definida da seguinte forma (Myers, 1986):

$$\begin{cases} \psi\left(\frac{e_i}{\sigma}\right) = \frac{e_i}{\sigma}, & \left|\frac{e_i}{\sigma}\right| \leq r \\ \psi\left(\frac{e_i}{\sigma}\right) = r, & \frac{e_i}{\sigma} > r \\ \psi\left(\frac{e_i}{\sigma}\right) = -r, & \frac{e_i}{\sigma} < -r \end{cases}$$

Onde  $e_i$  é o resíduo do modelo,  $\sigma$  é a raiz quadrada da variância do erro,  $e_i/\sigma$  são os resíduos studentizados e  $r$  é o factor limite (para um dado valor de  $r$ , um resíduo que exceda o valor  $\sigma$  não exercerá maior influência do que um resíduo com um valor de  $\sigma$ ). Myers (1986) sugere como valores razoáveis para o factor limite 1, 1,5 ou mesmo 2, e como estimativas robustas de  $\sigma$ ,  $\hat{\sigma} = 1,5(\text{mediana}|e_i|)$  com  $i = 1, 2, \dots, n$ , onde  $\text{mediana}|e_i|$  é a mediana dos resíduos absolutos.

A soma de quadrados dos resíduos ponderados é obtida da seguinte forma:

$$\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2, \text{ sendo } w_i = \psi(e_i / \hat{\sigma}) / (e_i / \hat{\sigma}), \text{ o factor de ponderação.}$$

A regressão ponderada pode ser usada como um mecanismo computacional para o cálculo do estimador  $M$  (Myers, 1986). Segundo o autor os pesos estão dependentes dos resíduos os quais, por sua vez, dependem dos coeficientes. Por este facto é necessário um procedimento iterativo para a sua obtenção baseado na seguinte metodologia (Myers, 1986):

1. Obtenção de um vector de estimativas iniciais  $\beta_0$  e a partir dele obter os resíduos;
2. A partir dos resíduos obtidos no ponto 1, calcular os factores de ponderação iniciais  $w_i$ ;
3. Usar os mínimos quadrados ponderados para obtenção de estimativas robustas dos parâmetros;
4. Deixar as estimativas dos parâmetros obtidas no ponto 3 assumir o papel do valor de  $\beta_0$  em 1 e obter novos resíduos e factores de ponderação;
5. Retomar o ponto 3.

Este procedimento, designado *iteratively reweighted least squares (IRWLS)*, deve ser continuado até que se verifique convergência.

Assim, as estimativas obtidas com a estimação dos mínimos quadrados não lineares ponderados iterativamente (*IRWLS*) usam um processo iterativo com um valor

inicial escolhido e continuamente melhorado até à soma de quadrados ponderada do erro ser minimizada. O uso de *IRWLS* muda as estimativas dos parâmetros e o erro padrão da estimativa relativa aos valores obtidos na ausência de ponderação (Ratkowsky, 1990).

Na presença de erros não normais os coeficientes de regressão assim obtidos são qualitativamente superiores aos obtidos pelo método dos mínimos quadrados não ponderados.

A heterocedasticidade foi verificada apenas graficamente devido à não normalidade dos resíduos studentizados, a qual torna impraticável o uso de qualquer teste estatístico.

Quando ocorrem variâncias não homogêneas, vários autores (*p. e.* Myers, 1986 e Huang *et al.*, 1992) recomendam o recurso aos mínimos quadrados não lineares ponderados, com selecção dos pesos inversamente proporcionais à variância do erro.

Assim, além da função influência de Huber foram ensaiados vários factores de ponderação, como a altura dominante na idade  $t_1$  ( $h_{dom_1}$ ), o seu inverso bem como o inverso da idade e ainda estes factores com diferentes expoentes, tendo-se obtido uma melhoria expressiva do aspecto dos resíduos studentizados em função dos valores estimados com o factor  $h_{dom_1}$ , relativamente ao conseguido somente com a função de Huber.

Após o reajustamento das funções recorreu-se igualmente à análise gráfica dos resíduos studentizados, produzidos após ponderação, para averiguação dos pressupostos da regressão.

A capacidade preditiva dos modelos foi expressa pelos valores dos percentis 95 % ( $P_{95}$ ) e 5 % ( $P_5$ ) e pelo cálculo da média e média do valor absoluto dos resíduos de predição *PRESS* ( $mPRESS$  e  $maPRESS$ , respectivamente), bem como pelo  $R^2$  de predição ( $R^2_{pred}$ ). O  $mPRESS$  fornece uma medida de enviesamento do modelo, enquanto que o  $maPRESS$  é essencialmente uma medida de precisão do mesmo. Os percentis são medidas de precisão mas também fornecem alguma informação sobre o enviesamento. Por sua vez, o  $R^2$  de predição é uma medida global da eficiência de modelação (comparável ao  $R^2$  de uma regressão).

Procedeu-se também à análise da adequação do modelo em termos biológicos através da observação do valor das assíptotas e pontos de inflexão estimados pelos diferentes modelos, bem como dos valores e sinais apresentados pelos diversos parâmetros, os quais permitem detectar comportamentos pouco lógicos.

A selecção do modelo final foi efectuada com base nos critérios de ajustamento, predição e comportamento biológico adequado referidos, para a estrutura de dados sem sobreposição.

O modelo assim seleccionado foi utilizado, posteriormente, para estimação dos parâmetros com diferentes métodos, considerando a autocorrelação dos erros evidenciada nos gráficos de resíduos studentizados.

#### **2.2.2.4. Estimação dos parâmetros do modelo seleccionado com diferentes métodos**

O modelo previamente seleccionado foi reajustado, quer com intervalos sem sobreposição, quer com todos os intervalos possíveis, considerando a autocorrelação dos erros, para melhorar a predição do crescimento em altura dominante e índice de qualidade da estação.

##### **2.2.2.4.1. Estrutura de dados sem sobreposição considerando autocorrelação dos erros**

O modelo seleccionado previamente foi reajustado com a estrutura de dados sem sobreposição considerando a autocorrelação de ordem *um* dos erros.

A estrutura do erro é, neste caso:

$$e_{i+1,i} = \gamma e_{i,i-1} + \varepsilon_i;$$

onde  $e_{i+1,i}$  é o resíduo de predizer  $h_{i+1}$  a partir de  $h_i$ ,  $\gamma$  tem em conta a correlação entre este resíduo e o resíduo de predizer  $h_i$  a partir de  $h_{i+1}$  e os erros serão agora independentes.

O ajustamento foi realizado, neste caso, recorrendo ao procedimento *PROC MODEL* do programa *Statistical Analysis System (SAS)*.

##### **2.2.2.4.2. Estrutura de dados com todos os intervalos possíveis considerando autocorrelação dos erros**

Uma vez seleccionado um modelo de entre as várias funções candidatas testadas com a estrutura de dados sem sobreposição e sem considerar a autocorrelação dos erros, e numa tentativa de obter estimadores centrados e mais eficientes e de resolver a correlação dos erros que era visível nos gráficos dos resíduos studentizados em função dos valores preditos, o modelo seleccionado foi reajustado com a estrutura de dados com todos os intervalos possíveis considerando no modelo a estrutura de correlação dos

erros. O ajustamento foi efectuado tendo em conta as duas autocorrelações de ordem *um* dos resíduos, tal como proposto por Goelz e Burk (1992) e Parresol e Vissage (1998).

A estrutura do erro é, neste caso:

$$e_{ij} = \rho e_{i-1,j} + \gamma e_{i,j-1} + \varepsilon_{ij};$$

onde  $e_{ij}$  é o erro de predizer  $h_i$  a partir de  $h_j$ ,  $\rho$  tem em conta a autocorrelação entre o resíduo  $e_{ij}$  e o resíduo de estimar  $h_{i-1}$  a partir de  $h_j$  e  $\gamma$  tem em conta a autocorrelação de estimar  $h_i$  a partir de  $h_{j-1}$ .

O ajustamento foi realizado, neste caso, recorrendo também ao procedimento *PROC MODEL* do programa *Statistical Analysis System (SAS)*.

#### **2.2.2.5. Selecção do modelo final**

No final do estudo a função previamente seleccionada diferia apenas na estimativa dos parâmetros obtida com os diferentes métodos. Assim, obtiveram-se três equações, uma ajustada com intervalos sem sobreposição, ponderada pela função influência de Huber com  $r = 1$  e simultaneamente com o factor de ponderação  $hdom_1$ , outra igualmente com intervalos sem sobreposição mas considerando a autocorrelação dos erros e, por último, uma equação ajustada com todos os intervalos possíveis, considerando igualmente a autocorrelação dos erros.

Para optar entre elas utilizamos um dos subconjuntos aleatórios independentes para validação com todos os intervalos possíveis. Para tal, efectuou-se o cálculo dos resíduos obtidos com cada um dos modelos e fez-se a sua análise tendo em conta o intervalo de projecção. Esta análise foi complementada com a observação das assíptotas.

### **2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **2.3.1. Selecção de um modelo**

O ajustamento das sete equações às diferenças, apresentadas no ponto 2.2.2.3., aos dados com intervalos sem sobreposição e a verificação dos respectivos pressupostos, pôs em evidência a não normalidade e a heterocedasticidade dos resíduos studentizados. Consequentemente, o ajustamento pelo método dos mínimos quadrados (*OLS*) mostrou-se inadequado (Montgomery e Peck, 1982). Para fazer face a esta situação recorreu-se a um procedimento resistente às condições não ideais como é o caso da regressão dos mínimos quadrados não lineares ponderada. Em consequência da

aplicação deste método procedeu-se ao reajustamento dos modelos com reavaliação dos parâmetros e das restantes estatísticas usadas para avaliar a qualidade do ajustamento e predição, já referidas na metodologia. No Quadro 2.5 são apresentados os valores dos parâmetros e das estatísticas do ajustamento, precisão e enviesamento dos modelos testados para a modelação do crescimento em altura dominante, descritos em 2.2.2.3., após ponderação pela função influência de Huber e pelo factor  $hdom_1$ .

Quadro 2.5: Valores das estimativas dos parâmetros, estatísticas de ajustamento, precisão e enviesamento dos modelos apresentados no ponto 2.2.2.3., após ponderação pela função influência de *Huder* e  $hdom_1$ .

Cód.	Parâmetros	SQR	QMR	EM	R <sup>2</sup> pred.	mPRESS (m)	maPRESS (m)	P95 (m)	P5
LK <sub>1</sub>	A=73,6962 n=0,4902	816,0000	1,3646	0,9964	0,9927	<u>0,0334</u>	0,3802	0,9714	-0,7360
LK <sub>2</sub>	k=6,7486 n=0,3238	1135,7000	1,8992	0,9949	0,9913	0,1733	0,4359	1,2441	-0,5497
CR <sub>1</sub>	A=30,4965 m=0,3040	779,6000	1,3036	0,9964	0,9953	0,0948	0,3451	0,9428	-0,5377
CR <sub>2</sub>	k=0,0308 m=0,2475	893,4000	1,4940	0,9960	0,9942	0,1417	0,3837	1,0830	-0,6376
CR <sub>3</sub>	A=32,0918 k=0,0285	812,4000	1,3585	0,9963	<u>0,9959</u>	0,0844	<u>0,3397</u>	0,8891	-0,5328
MA	A=35,9282 n=1,4629	<u>738,9000</u>	<u>1,2356</u>	<u>0,9967</u>	0,9953	0,0841	0,3413	0,9154	-0,5427
AB	k=-0,0860 n=-5,1552	1312,8000	2,1953	0,9939	0,9885	0,2994	0,5215	1,5397	-0,5754

P95, percentil 95 %; P5, percentil 5 %; EM, eficiência de modelação.

A análise dos gráficos de resíduos studentizados em papel de probabilidades normal, das equações AB, CR<sub>2</sub>, CR<sub>3</sub> e LK<sub>2</sub> revelaram caudas inferiores ainda relativamente pesadas após a aplicação da função influência de Huber, com o valor limite de  $r=1$ , o que demonstra que o problema da não normalidade dos resíduos não foi completamente ultrapassado, para estes modelos, com a aplicação da ponderação efectuada. Relativamente aos restantes modelos, os resíduos studentizados são considerados normais, após correcção. Relativamente à análise gráfica dos resíduos studentizados vs. altura dominante estimada, os modelos CR<sub>1</sub> e MA apresentaram, após correcção, a melhor distribuição.

A regressão ponderada com utilização da função influência de Huber com o valor limite de  $r = 1$ , foi aplicada no reajustamento das sete funções consideradas. Como é sabido o uso de factores de ponderação muda as estimativas dos parâmetros e o

erro padrão da estimativa relativa aos valores obtidos na ausência de ponderação. No entanto, as comparações das estatísticas de ajustamento para várias funções podem ser feitas se for usado o mesmo peso em todas as funções ajustadas e empregue o mesmo método iterativo dos mínimos quadrados não lineares (Huang *et al.*, 1992). Por esta razão, e uma vez que usámos o mesmo método iterativo dos mínimos quadrados de Gauss-Newton para minimizar a soma dos quadrados dos resíduos para todas as funções, procedeu-se à comparação dos diferentes modelos. Contudo, temos a noção de que a função de Huber actua de acordo com a grandeza dos erros gerados no processo de ajustamento dos modelos, não exercendo necessariamente o mesmo peso nos resíduos originados com as diferentes funções. Admitimos, todavia, dado o valor do factor limite utilizado, que esta diferença não será considerável.

Tendo em conta o valor dos parâmetros e das estatísticas de ajustamento apresentadas no Quadro 2.5, seleccionamos numa primeira análise o modelo McDill-Amateis (*MA*), por possuir os valores mais baixos de *SQR* e *QMR*, apresentando, simultaneamente, uma assíptota com um valor superior ao máximo da altura dominante observada (35,93 m) traduzindo o potencial da estação a longo prazo, seguido dos modelos *CRI*, *CR3* e *LKI*, respectivamente. É de salientar que os modelos Chapman-Richards, sobretudo o modelo (*CRI*), apresentam valores assimptóticos muito próximos do valor máximo observado nas árvores abatidas (30,4 m), enquanto o modelo *LKI* apresenta uma assíptota biologicamente irrealista.

Segundo Castroviejo *et al.* (1990) a *Castanea sativa* pode atingir os 30 m de altura máxima, embora existam nos povoamentos em estudo árvores com alturas superiores a este valor, pelo que consideramos preferível optar por um modelo com um valor assimptótico superior, que traduza melhor a potencialidade da espécie em termos de crescimento em altura.

Assim, dos quatro modelos resultantes da primeira selecção, com base nas estatísticas de ajustamento e valores dos parâmetros, permanecem apenas três, *MA*, *CR3* e *LKI*. Comparando este três últimos modelos verificamos uma superioridade do modelo *MA* em quase todas as estatísticas calculadas, além de que o modelo *CR3* possui uma assíptota baixa, embora acima do valor da altura dominante máxima observada, e o modelo *LKI* uma assíptota com um valor muito para além da potencialidade da espécie em termos de crescimento em altura. Os gráficos de resíduos studentizados confirmam igualmente a superioridade do modelo *MA* para os nossos dados.

Tendo em conta as estatísticas de precisão e enviesamento, poderemos dizer que, numa maneira geral, todos os modelos ajustados são positivamente enviesados, embora com valores muito baixos, originando estimativas da altura dominante inferiores aos respectivos valores observados.

A análise dos gráficos em papel de probabilidades normal dos resíduos studentizados das equações Chapman-Richards, revelou, como já se disse, caudas inferiores ainda relativamente pesadas, após a aplicação da função influência de Huber com o valor limite de  $r=1$ , o que demonstra que o problema da não normalidade dos resíduos não foi completamente ultrapassado, para estes modelos, com a aplicação da ponderação efectuada.

Pelas razões apontadas seleccionamos também o modelo *MA* com base nos critérios de precisão e enviesamento utilizados, apesar de levemente mais enviesado do que o modelo *LK1* e ligeiramente menos preciso que o modelo *CR3*.

A média do valor absoluto dos resíduos de predição para o modelo *MA* é de 34,1 *cm*. O valor do ponto de inflexão deste modelo ocorre quando  $h_{dom} = (A/2)*(1-1/n)$  (onde  $A$  representa a assíntota e  $n$  um parâmetro dependente do povoamento), ou seja, quando  $h_{dom} = 5,68$  *m*, o que acontece em média por volta dos 13 a 15 anos. Segundo Devan e Burkhart (1982), o ponto de inflexão deve ocorrer na idade em que o acréscimo em altura é máximo. Tendo em conta os gráficos dos acréscimos em altura para as árvores individualmente verificou-se que a moda, ou seja, o valor mais frequente do acréscimo corrente máximo em altura, ocorre aos 15 anos de idade, embora a média se situe à volta dos 21 anos, com valores mais baixos para Bornes, seguidos do Marão e Padrela, respectivamente. Em termos da ocorrência do máximo do acréscimo médio em altura este é atingido com mais frequência aos 15 anos, mas a média ronda os 26 anos.

O modelo final seleccionado com base nos critérios utilizados é o modelo McDill-Amateis (*MA*) cujos gráficos dos resíduos studentizados em papel de probabilidades normal, antes e depois da ponderação, são apresentados na Figura 2.3. Como se pode observar os resíduos studentizados apresentam uma distribuição que não se afasta da normal, após reajustamento pelo método dos mínimos quadrados ponderados. O histograma dos resíduos studentizados após ponderação apresentado na Figura 2.4 confirma a aproximação à normal. Por sua vez, o gráfico dos resíduos studentizados vs. altura dominante estimada é apresentado na Figura 2.5.

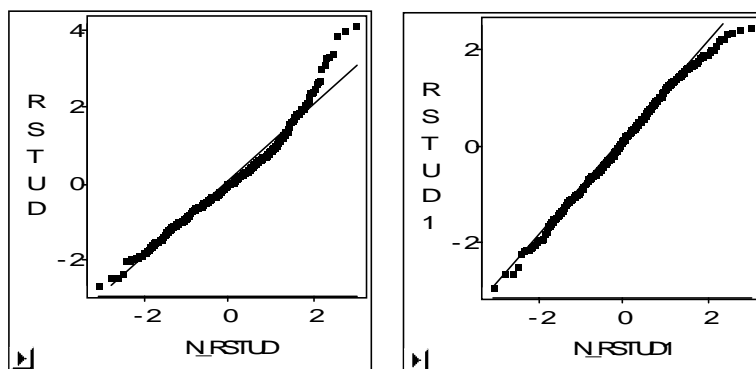


Figura 2.3 : Gráficos em papel de probabilidades normal para os resíduos studentizados obtidos com o modelo McDill-Amateis, com intervalos sem sobreposição, antes ( $RSTUD$ ) e depois ( $RSTUD1$ ) da ponderação efectuada (função influência de  $Huder$  e  $hdom_1$ ).

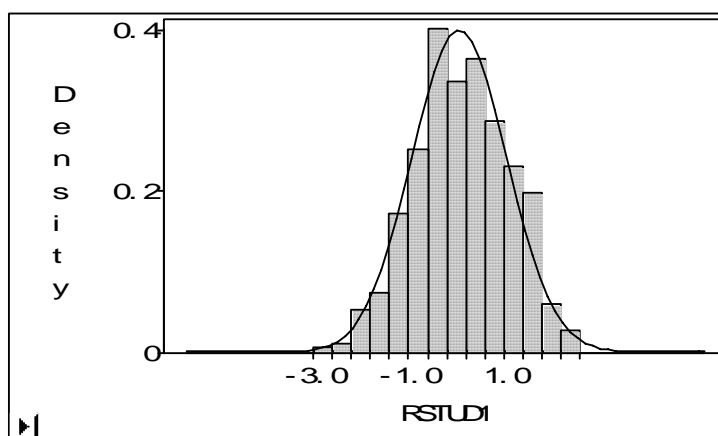


Figura 2.4: Histograma dos resíduos studentizados com aproximação à normal após ponderação (função influência de  $Huder$  e  $hdom_1$ ).

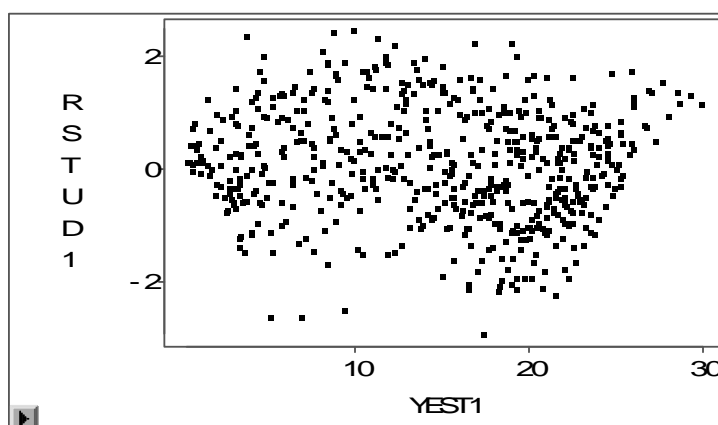


Figura 2.5: Gráfico dos resíduos studentizados vs. altura dominante estimada, para o modelo McDill-Amateis, com intervalos de crescimento sem sobreposição, após ponderação (função influência de  $Huder$  e  $hdom_1$ ).

A Figura 2.6 comprova o bom ajustamento do modelo *MA* cujo enviesamento dado pela média dos resíduos de predição obtidos com um ficheiro de dados de validação independente é nulo na idade de referência (45 anos), e praticamente nulo nas suas proximidades. O afastamento médio é ligeiramente superior para as idades inferiores a 30 anos, embora permaneça inferior a 0,3 m. Por sua vez, a média do valor absoluto do erro é igualmente reduzida, sendo inferior a 0,2 m acima dos 35 anos e ligeiramente superior para idades inferiores. Assim, o modelo *MA* pode ser utilizado para estimar o crescimento em altura dominante com elevada precisão em toda a gama de intervalos de dados usados na sua construção, e muito particularmente dos 35 aos 65 anos de idade. Note-se que as projecções realizadas correspondem a períodos de três anos, visto que se utilizaram os dados provenientes da análise do tronco trienais.

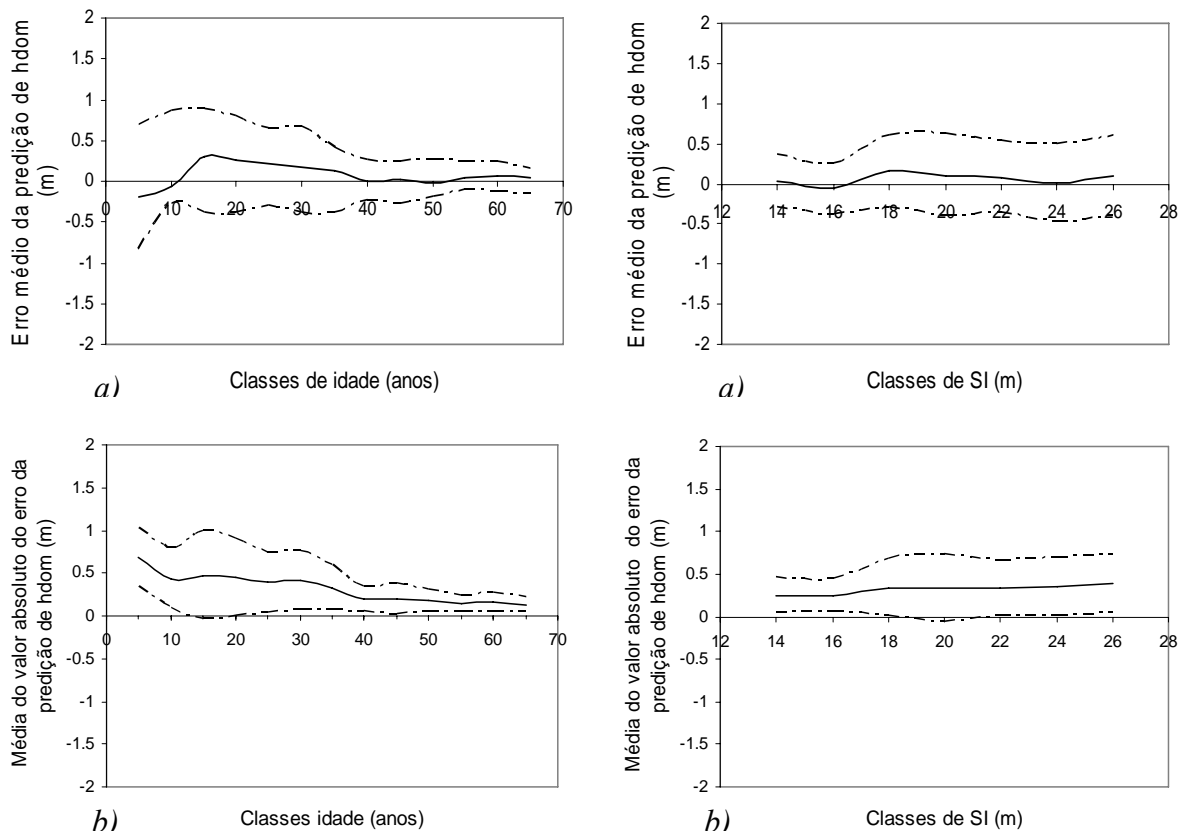


Figura 2.6: Erro médio *a)* e erro médio em valor absoluto *b)*, por classes de idade e de *SI*, da predição do crescimento em altura dominante com o modelo *MA*, linha (—), e respectivo desvio padrão, linha (---), com intervalos sem sobreposição, após ponderação (função influência de *Huder* e  $hdom_1$ ).

A análise dos erros do modelo por classes de  $SI$ , em termos do valor absoluto do erro por períodos trienais, é inferior a  $0,4\text{ m}$ , enquanto que o enviesamento médio é inferior a  $0,2\text{ m}$ . O maior enviesamento ocorre na classe de  $SI$  de  $18\text{ m}$ .

Se analisarmos o enviesamento médio obtido entre os valores de  $SI$  observados, ou seja, a altura dominante observada aos 45 anos de idade, e o  $SI$  estimado pelo modelo, com a idade padrão de 45 anos, verifica-se que este é nulo na idade de referência e praticamente nulo nas classes de idade dos 40 aos 60 anos. Aumenta, como normalmente acontece, à medida que nos afastamos da idade de referência, como se pode ver na Figura 2.7 e o mesmo acontece para o erro absoluto médio, o que demonstra maior precisão nas proximidades dos 45 anos, que corresponde à idade padrão considerada. O erro médio da predição de  $SI$  na idade padrão, por classe de  $SI$ , atinge o seu valor máximo ( $1,4\text{ m}$ ) na classe dos  $18\text{ m}$ . Por sua vez a média do valor absoluto do erro mais elevada ( $2\text{ m}$ ) é observada também nessa mesma classe. Não se verifica, contudo, uma grande diferença para as diferentes classes de qualidade.

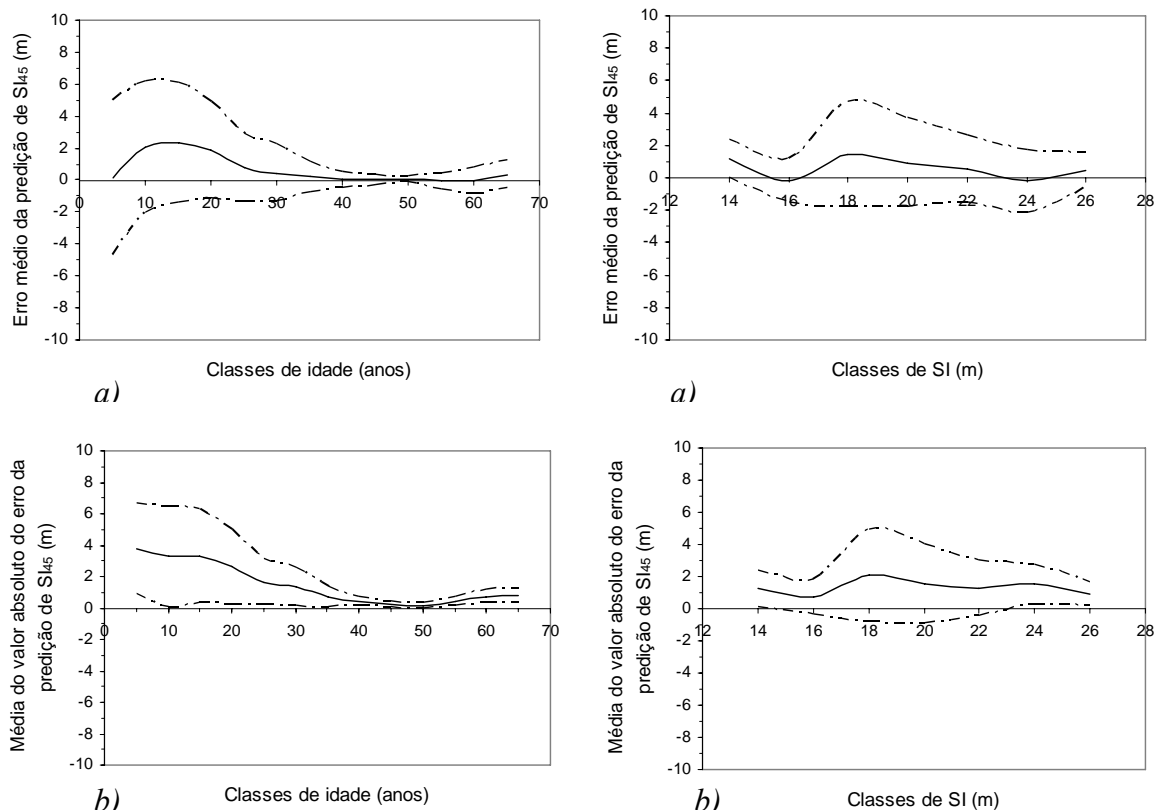


Figura 2.7: Erro médio *a)* e erro médio em valor absoluto *b)*, para as estimativas de  $SI_{45}$ , por classes de idade e de  $SI$ , linha (—), e desvio padrão, linha (---), utilizando o mesmo modelo ( $MA$ ) para a determinação do  $SI$ , com intervalos sem sobreposição.

### 2.3.1.1. Estimação dos parâmetros do modelo seleccionado com diferentes métodos

O modelo McDill-Amateis seleccionado da forma já descrita no ponto 2.3.1., foi utilizado para a modelação do crescimento em altura dominante e definição dos índices de qualidade da estação com vista à construção das curvas de classe de qualidade. Assim, definido o modelo, este foi reajustado, quer com intervalos sem sobreposição, quer com todos os intervalos possíveis, considerando a autocorrelação dos erros, com vista à obtenção de estimativas dos parâmetros mais eficientes.

Os valores dos parâmetros, respectivos erros padrões e estatísticas obtidas no processo de ajustamento dos modelos a estruturas de dados quer com intervalos sem sobreposição, quer com todos os intervalos possíveis, considerando a autocorrelação dos erros, encontram-se no Quadro 2.6. No reajustamento do modelo com a estrutura de dados com intervalos sem sobreposição foi usado como factor de ponderação  $hdom_1$  com o objectivo de corrigir a heterocedasticidade dos resíduos.

Quadro 2.6: Resultados do ajustamento do modelo *MA* a diferentes estruturas de dados, considerando a autocorrelação dos erros.

Cód. Mod. (Estrut. dados)	Parâmetros	QMR	EM	mres (m)	mares (m)	P95 (m)	P5
MA (Int. sem sobrep.)	A=35,9716 (1,2601)* n=1,4516 (0,0551)* $\gamma=0,5236$ (0,0304)*	1,1724	0,9970	0,0946	0,3402	1,9545	-1,5716
MA (Int. com sobrep.)	A=34,8559 (0,1797)* n=1,6160 (0,0064)* $\rho=-0,9597$ (0,0027)* $\gamma=0,0753$ (0,0026)*	0,2170	0,9964	0,0011	1,3098	0,7604	-0,6557

\*, erro padrão dos parâmetros; *mres*, média dos resíduos ordinários; *mares*, média do valor absoluto dos resíduos ordinários.

O reajustamento do modelo *MA* à estrutura de dados com intervalos sem sobreposição, considerando a autocorrelação dos erros, permitiu eliminar totalmente a correlação que à partida já não era muito grande. Os gráficos de resíduos ordinários vs. valores estimados, antes e depois de se proceder à expansão do termo do erro são apresentados na Figura 2.8. Como se pode observar existe uma melhoria expressiva na qualidade dos resíduos quando se considera a autocorrelação dos erros.

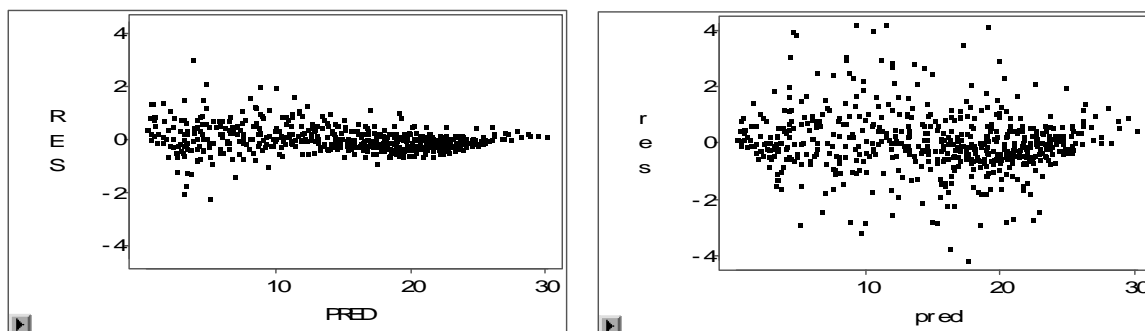


Figura 2.8: Comparação dos resíduos ordinários vs. valores preditos obtidos com o modelo *MA* ajustado com uma estrutura de dados com intervalos sem sobreposição, antes e depois da expansão do termo do erro.

O reajustamento do modelo com todos os intervalos possíveis, tendo em conta igualmente a autocorrelação dos erros, não permitiu eliminar totalmente este problema, embora se tenha conseguido uma melhoria expressiva visível na distribuição dos resíduos em função dos valores estimados (*vide* Figura 2.9). Nesta análise foram usados os resíduos ordinários uma vez que não se conseguiu obter os resíduos studentizados com o procedimento *PROC MODEL* do programa *SAS*, usado, como já se referiu, no reajustamento dos modelos.

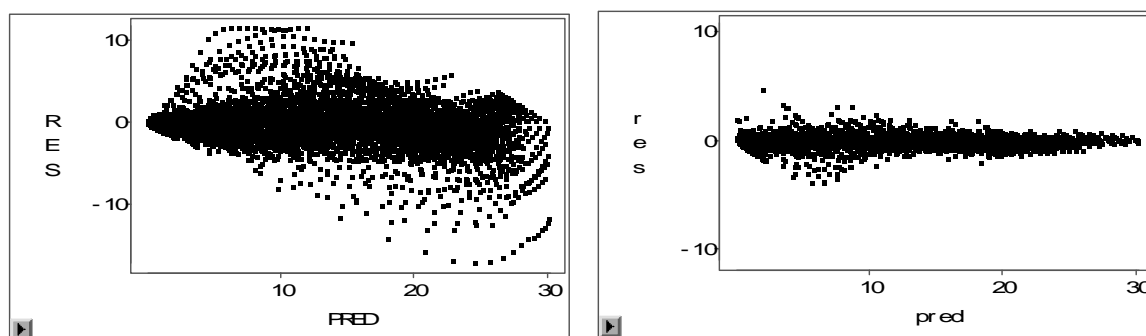


Figura 2.9: Comparação dos resíduos ordinários vs. valores preditos obtidos com o modelo *MA* ajustado com uma estrutura de dados com todos os intervalos possíveis, antes e depois da expansão do termo do erro.

A representação da distribuição dos resíduos de estimar  $h_{i-1}$  a partir de  $h_j$  e  $h_i$  a partir de  $h_{j-1}$ , antes e depois da expansão do termo do erro, é apresentada na Figura 2.10. Como se pode observar existe uma melhoria considerável na qualidade dos resíduos quando se considera a autocorrelação dos erros com a expansão do termo do erro.

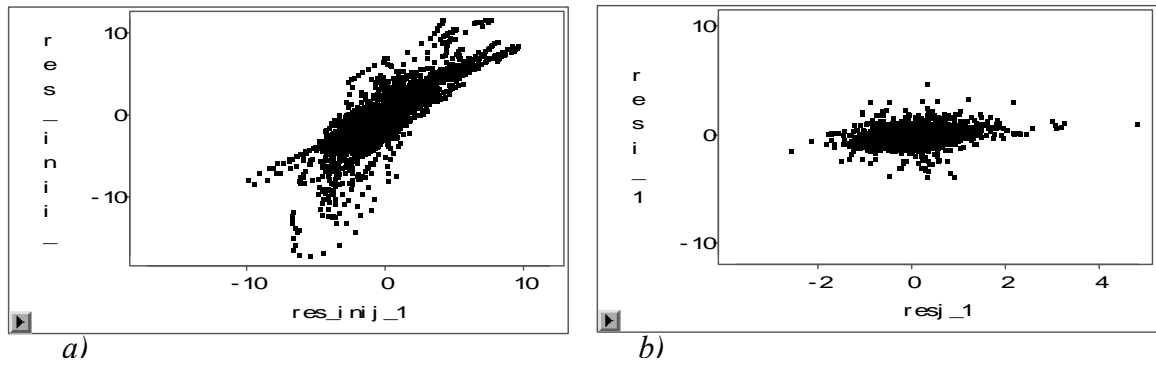


Figura 2.10: Comparação da relação entre os resíduos resultantes da predição de  $h_{i-1}$  a partir de  $h_j$  e  $h_i$  a partir de  $h_{j-1}$ , antes a) e depois b), da expansão do termo do erro.

### 2.3.1.1.1. Comparação e selecção de um modelo final

Para a comparação dos modelos utilizámos, numa primeira fase, um ficheiro de dados, independente do utilizado no ajustamento, com todos os intervalos possíveis. Na Figura 2.11 comparam-se as médias dos resíduos de predição da altura dominante em função do intervalo de projecção para o modelo *MA* obtido com diferentes métodos: o modelo seleccionado inicialmente com intervalos sem sobreposição, não considerando a autocorrelação dos erros *MA\_0*; o mesmo modelo reajustado, quer com intervalos sem sobreposição *MA\_1*, quer com todos os intervalos possíveis *MA\_2*, tendo em conta a autocorrelação dos erros.

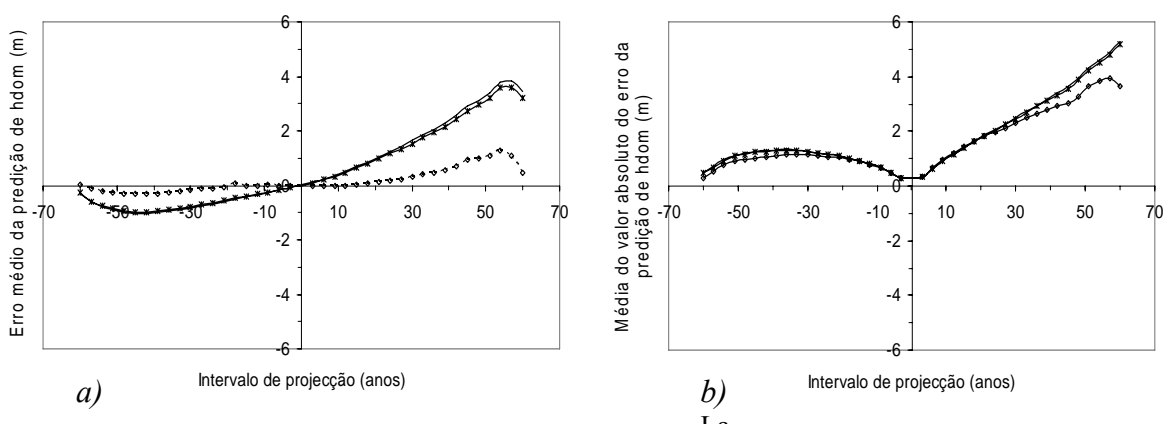


Figura 2.11: Erro médio a) e erro médio em valor absoluto b), da predição de *hdom*, por intervalo de projecção para o modelo *MA* ajustado com diferentes métodos: *MA\_0*, linha (—x—), *MA\_1*, linha (—) e *MA\_2*, linha (—◇—).

Como se pode observar na Figura 2.11 os erros aumentam à medida que o intervalo de projecção aumenta, particularmente quando se faz uma predição da altura dominante numa idade superior com base na altura dominante numa idade inferior, ou seja, a qualidade da estimação da altura dominante depende do intervalo de projecção, muito embora o reajustamento do modelo com uma estrutura de dados com todos os intervalos possíveis, considerando a autocorrelação dos erros, seja claramente superior aos restantes, principalmente quando se tem em conta a análise do erro médio.

Relativamente ao ajustamento do modelo com uma estrutura de dados sem sobreposição, considerando ou não a autocorrelação dos erros, a tendência do modelo é semelhante apresentando um ganho reduzido com a expansão do termo do erro.

No que se refere à estrutura de dados com todos os intervalos possíveis, verifica-se um ganho apreciável com o reajustamento do modelo a esta estrutura de dados considerando a autocorrelação dos erros. Como se pode observar na Figura 2.11 o modelo *MA\_2* apresenta erros médios bastante inferiores aos restantes. As projecções obtidas com o modelo *MA\_2* conduzem a erros médios semelhantes, tanto quando se fazem predições para a frente como para trás. A excepção ocorre para intervalos de projecção ao redor de 50 anos, onde se verificam erros médios superiores quando se estima a altura dominante numa idade superior com base na altura dominante numa idade inferior. Para intervalos de projecção inferiores a 40 anos o erro cometido é semelhante, tanto para a frente como para trás, embora com sinais contrários.

No que se refere à média do valor absoluto do erro, a tendência do modelo obtido com diferentes métodos é semelhante para predições da altura dominante numa idade inferior, com base no conhecimento da altura dominante numa idade superior, seja qual for o intervalo de projecção. Tendo em vista a predição da altura dominante numa idade superior com base no conhecimento da altura dominante numa idade inferior, a média do valor absoluto do erro é superior ao da projecção inversa para intervalos superiores a 15 anos. O modelo reajustado com uma estrutura de dados com todos os intervalos possíveis *MA\_2* é também aqui claramente superior aos restantes.

No que diz respeito ao erro médio e erro médio em valor absoluto da predição da altura dominante, quer por classes de idade, quer por classes de *SI*, observa-se também uma clara superioridade do modelo *MA\_2* relativamente aos restantes (*vide* Figura 2.12).

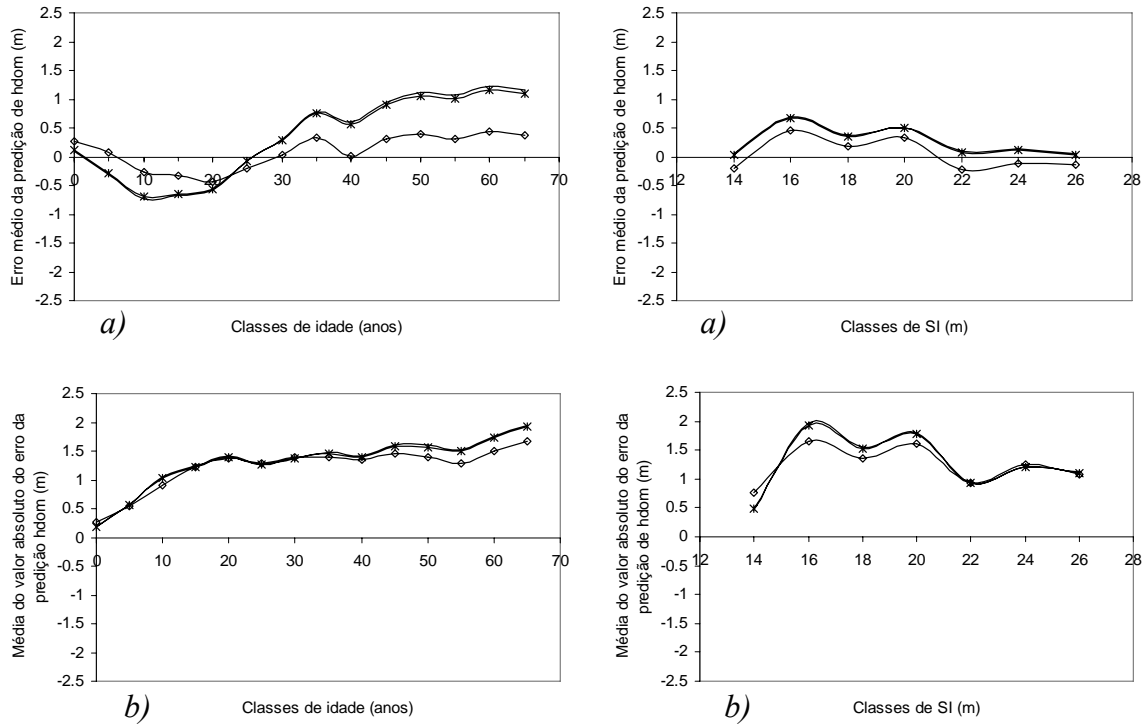


Figura 2.12: Erro médio *a)* e erro médio em valor absoluto *b)* da predição de *hdom* com um ficheiro de validação com todos os intervalos possíveis, por classes de idade e de *SI*, para o modelo *MA* ajustado com diferentes métodos: *MA\_0*, linha (—x—), *MA\_1*, linha (—) e *MA\_2*, linha (—◇—).

O ficheiro de dados de validação com uma estrutura de dados com todos os intervalos possíveis foi utilizado também para análise do comportamento do modelo *MA*, ajustado com diferentes métodos, relativamente à predição de *SI<sub>45</sub>*, tendo em conta o intervalo de projecção. A análise gráfica é apresentada na Figura 2.13.

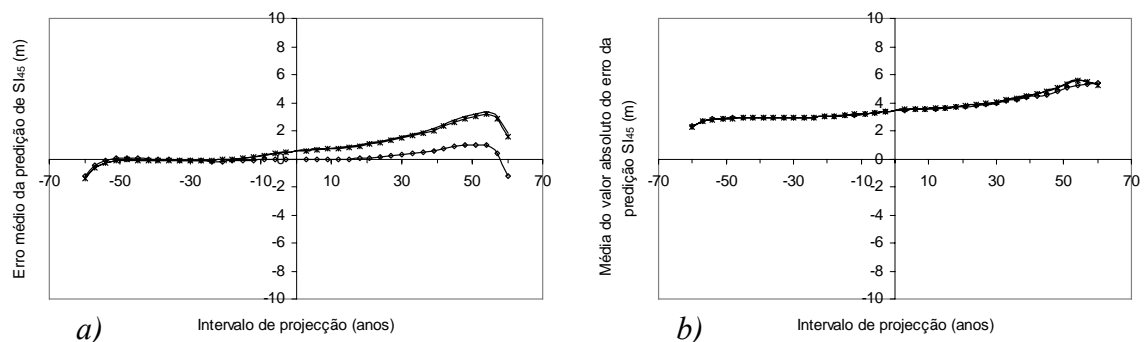


Figura 2.13: Erro médio *a)* e erro médio em valor absoluto *b)*, da predição de *SI<sub>45</sub>*, por intervalo de projecção para o modelo *MA* ajustado com diferentes métodos: *MA\_0*, linha (—x—), *MA\_1*, linha (—) e *MA\_2*, linha (—◇—).

Como se pode observar na Figura 2.13 o modelo  $MA_2$  é considerado superior aos restantes, principalmente no que se refere ao erro médio da predição de  $SI_{45}$ . Também aqui o erro tem tendência a aumentar para grandes intervalos de projecção (40 a 50 anos) quando se estima a classe de qualidade para uma idade superior à de referência. Em termos da média do valor absoluto do erro da predição de  $SI_{45}$  não existe uma grande diferença nas estimativas obtidas para os diferentes intervalos de projecção.

No que diz respeito ao erro médio e erro médio em valor absoluto da predição de  $SI_{45}$ , quer por classes de idade, quer por classes de  $SI$ , observa-se também uma superioridade do modelo  $MA_2$  relativamente aos restantes (*vide* Figura 2.14). O maior erro verifica-se nas classes de  $SI$  de 14 e 24 m. O desvio médio da predição de  $SI_{45}$  por classes de idade é muito reduzido, inferior a 0,55 m, excluindo as classes extremas onde pode atingir 1 m.

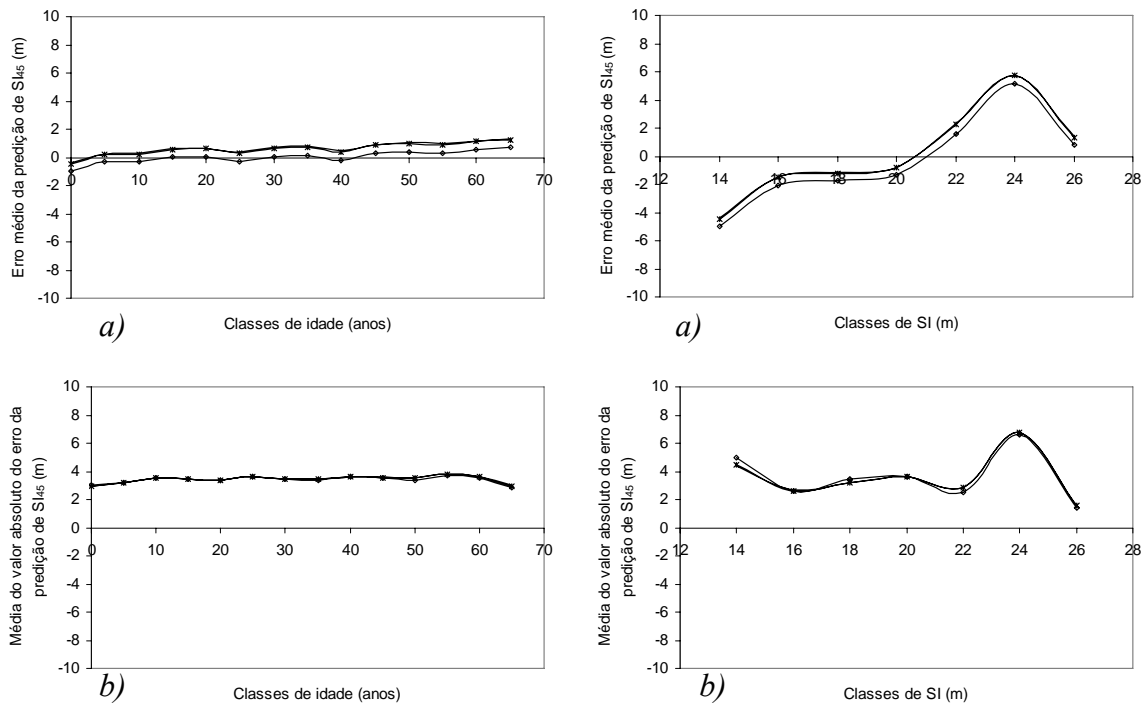


Figura 2.14: Erro médio *a)* e erro médio em valor absoluto *b)* da predição de  $SI_{45}$  com um ficheiro de validação com todos os intervalos possíveis, por classes de idade e de  $SI$ , para o modelo  $MA$  ajustado com diferentes métodos:  $MA_0$ , linha (—x—),  $MA_1$ , linha (—) e  $MA_2$ , linha (—◇—).

Se considerarmos a validação com um ficheiro de dados independente, com uma estrutura de dados com intervalos sem sobreposição, o comportamento do modelo  $MA_2$  continua a apresentar desvios médios do erro de predição ( $hdom$  e  $SI_{45}$ ), inferiores aos restantes (*vide* Figuras 2.15 e 2.16).

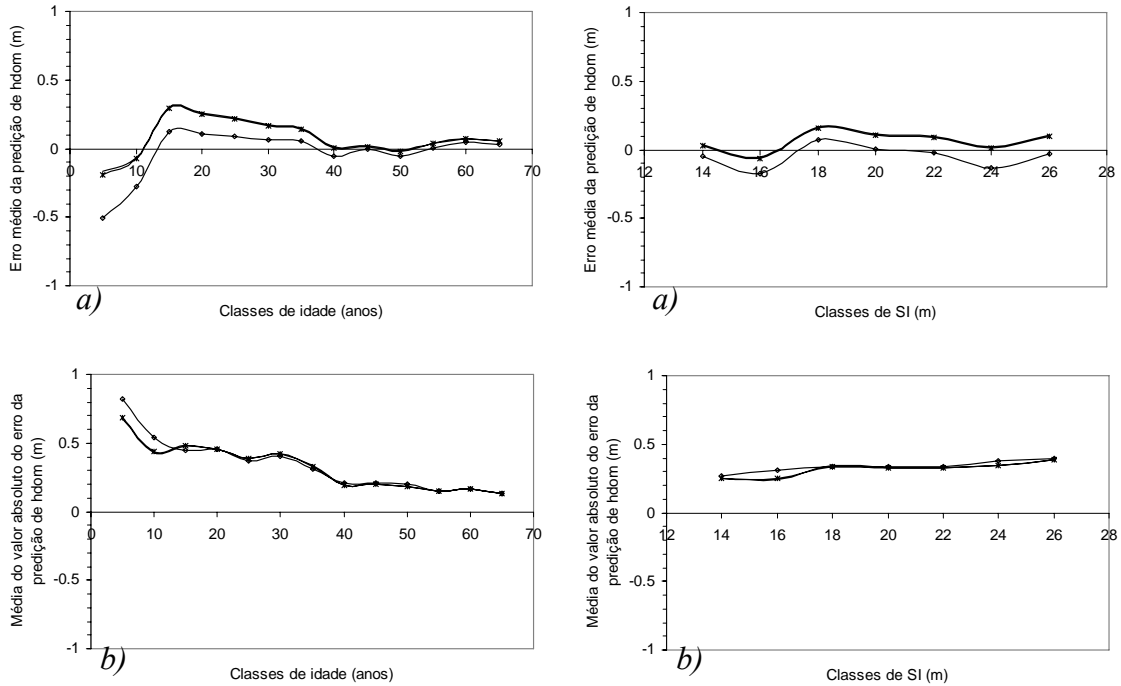


Figura 2.15: Erro médio *a)* e erro médio em valor absoluto *b)* da predição de  $h_{dom}$  com um ficheiro de validação com intervalos sem sobreposição, por classes de idade e de  $SI$ , para o modelo  $MA$  ajustado com diferentes métodos:  $MA_0$ , linha (—x—),  $MA_1$ , linha (—) e  $MA_2$ , linha (—◇—).

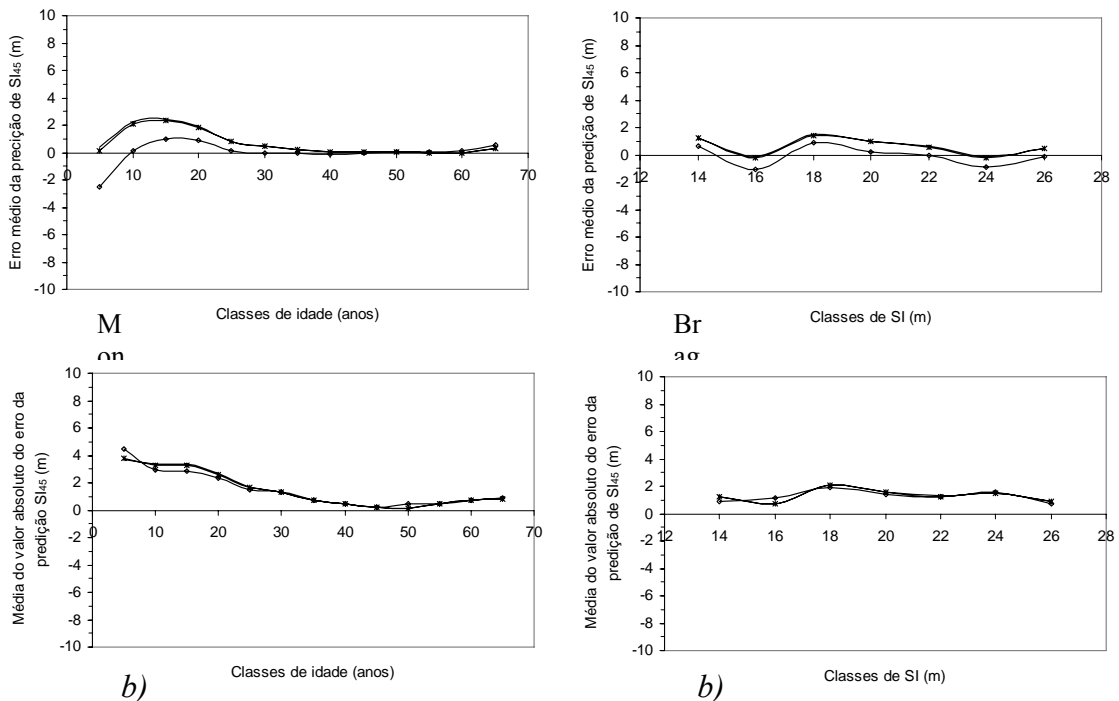


Figura 2.16: Erro médio *a)* e erro médio em valor absoluto *b)* da predição de  $SI_{45}$  com um ficheiro de validação com intervalos sem sobreposição, por classes de idade e de  $SI$ , para o modelo  $MA$  ajustado com diferentes métodos:  $MA_0$ , linha (—x—),  $MA_1$ , linha (—) e  $MA_2$ , linha (—◇—).

Tendo em conta os resultados da validação do modelo *MA* reajustado com diferentes métodos, parece-nos evidente a superioridade do modelo *MA\_2* como se demonstrou na análise gráfica apresentada ao longo deste ponto. Assim, apesar da autocorrelação dos erros não ter sido completamente eliminada para este modelo o seu desempenho é superior ao dos restantes. Se tivermos em consideração a análise do valor das assíptotas, obtidas com os diferentes reajustamentos, verificamos uma ligeira diminuição deste valor para o modelo *MA\_2*, relativamente aos restantes, mantendo-se acima do máximo observado. Contudo esta diminuição é compensada com uma melhor predição da altura dominante e *SI*<sub>45</sub>.

### 2.3.2. Construção das curvas de classe de qualidade

No reajustamento do modelo *MA* com diferentes métodos obtiveram-se as equações *MA\_0*, *MA\_1* e *MA\_2*.

*MA\_0* - modelo *MA* seleccionado no ponto 2.3.1, ajustado com uma estrutura de dados com intervalos sem sobreposição, não considerando a autocorrelação dos erros:

$$\text{Modelo ajustado: } y_2 = \frac{35,9282}{1 - \left(1 - \frac{35,9282}{hdom_1}\right) \left(\frac{t1}{t2}\right)^{1,4629}} \quad EM = 0,9967$$

*MA\_1* - modelo *MA* reajustado com uma estrutura de dados com intervalos sem sobreposição, considerando a autocorrelação dos erros:

$$\text{Modelo reajustado: } y_2 = \frac{35,97163}{1 - \left(1 - \frac{35,97163}{hdom_1}\right) \left(\frac{t1}{t2}\right)^{1,45164}} \quad EM = 0,9970$$

*MA\_2* - modelo *MA* reajustado com uma estrutura de dados com todos os intervalos possíveis, tendo em conta a autocorrelação dos erros:

$$\text{Modelo reajustado: } y_2 = \frac{34,85593}{1 - \left(1 - \frac{34,85593}{hdom_1}\right) \left(\frac{t1}{t2}\right)^{1,61604}} \quad EM = 0,9964$$

Onde  $y_2$  representa tanto a altura dominante  $hdom_2$  na idade  $t_2$  como o índice de qualidade da estação na idade de referência de 45 anos  $SI_{45}$ , e  $hdom_1$  a altura dominante na idade  $t_1$ .

Como já se disse o modelo *MA\_2* é superior aos restantes, tanto na predição de  $hdom$  como na predição de  $SI_{45}$ . Na Figura 2.17 mostra-se o traçado das curvas de classe

de qualidade, sobrepostas com as curvas de crescimento em altura dominante das 33 árvores abatidas usadas para a sua construção.

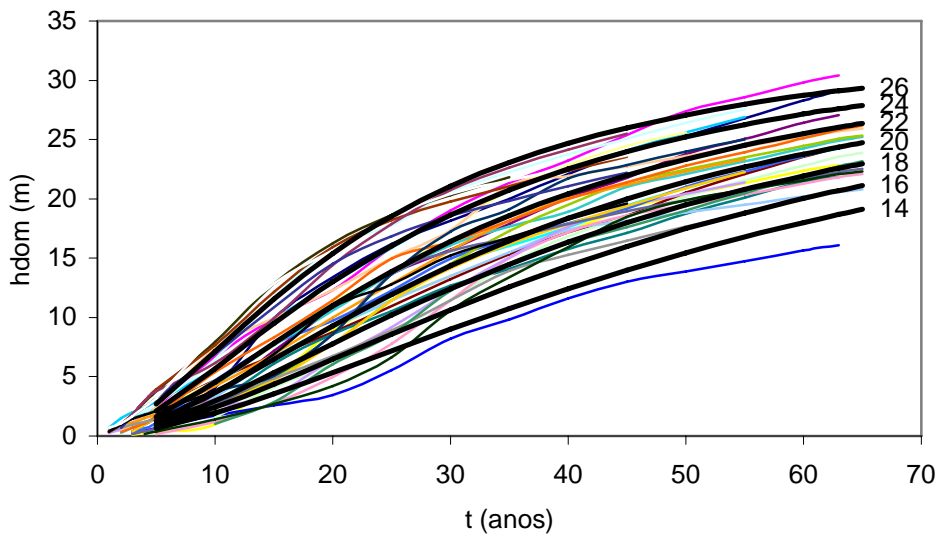


Figura 2.17: Curvas de classe de qualidade sobrepostas com as curvas de crescimento em altura dominante das árvores abatidas usadas para a sua construção.

As curvas de classe de qualidade obtidas com o modelo *MA\_2* são apresentadas na Figura 2.18. Consideraram-se 7 classes de qualidade que nos permitem estimar o índice de qualidade da estação definido como a altura dominante na idade de referência de 45 anos.

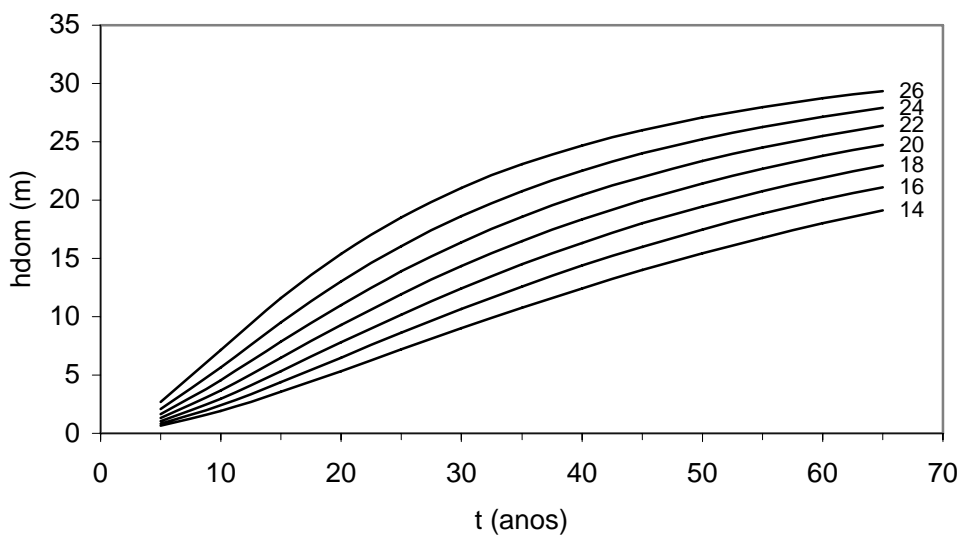


Figura 2.18: Curvas de classe de qualidade para o castanheiro em regime de alto fuste.

## 2.4. CONCLUSÕES

Para a modelação da altura dominante e índice de qualidade da estação usámos o método das equações às diferenças com duas estruturas de dados: intervalos sem sobreposição e todos os intervalos possíveis.

Assim, numa primeira fase, seleccionou-se, de entre os modelos testados, o modelo McDill-Amateis com uma estrutura de dados sem sobreposição. Esta equação foi reajustada posteriormente, considerando a autocorrelação de ordem  $um$  dos erros, tanto com intervalos sem sobreposição, como com todos os intervalos possíveis.

Os melhores resultados foram conseguidos com o modelo  $MA$  reajustado com todos os intervalos possíveis, considerando a autocorrelação dos erros:

$$y_2 = \frac{34,85593}{1 - \left(1 - \frac{34,85593}{hdom_1}\right) \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{1,61604}} \quad EM=0,9964$$

Onde  $y_2$  representa tanto a altura dominante  $hdom_2$  (m) na idade  $t_2$  (anos) como o índice de qualidade da estação na idade padrão de 45 anos  $SI_{45}$ , e  $hdom_1$  (m) a altura dominante na idade  $t_1$  (anos).

O uso de todos os intervalos possíveis com expansão do termo do erro de forma a considerar a existência de correlação entre os resíduos dentro de uma mesma árvore, que caracteriza dados provenientes de medições repetidas no mesmo indivíduo, como acontece com a análise do tronco, conduziu a melhores predições, quer da altura dominante, quer do índice de qualidade da estação.

O modelo obtido é invariante para o intervalo de projecção embora o erro seja maior para intervalos superiores a 30 anos, sobretudo quando se fazem predições para a frente, tanto no que se refere à altura dominante como ao índice de qualidade da estação. No que concerne à altura dominante o desvio médio mais elevado é de 1,2 m observado para um intervalo de projecção de 57 anos e um mínimo de  $\pm 0,002$  m nas classes de 3 e 15 anos, respectivamente. No que diz respeito ao índice de qualidade da estação obtém-se um desvio médio máximo de 1,2 m para um intervalo de projecção de 60 anos, com valores bastante inferiores para intervalos mais curtos (mínimo de -0,004 m para um intervalo de projecção de 15 anos).

Este modelo foi usado no traçado das curvas de classe de qualidade apresentadas para o castanheiro, originando curvas polimórficas.

## CAPÍTULO III

### CURVA HIPSOMÉTRICA GERAL PARA O CASTANHEIRO EM REGIME DE ALTO FUSTE

A avaliação do crescimento e produção de povoamentos de *Castanea sativa* pressupõe o desenvolvimento prévio de uma série de equações para a árvore individual que serão desenvolvidas ao longo dos capítulos *III*, *IV* e *V*, apresentando-se no final, um modelo de crescimento potencial com função modificadora e uma tabela ou modelo de produção para a espécie, nos capítulos *VI* e *VII*, respectivamente. Neste capítulo desenvolve-se uma curva hipsométrica geral para o castanheiro em regime de alto fuste para a região de Trás-os-Montes e Entre Douro e Minho.

#### 3.1. RELAÇÕES HIPSOMÉTRICAS GERAIS

##### 3.1.1. Revisão bibliográfica

A altura total é geralmente requerida para a estimação do crescimento e produção como o volume da madeira ou a biomassa das árvores nos povoamentos florestais. A maioria dos modelos de predição de biomassa utiliza a altura total das árvores como variável preditora, geralmente com diâmetros de referência como o diâmetro à altura do peito ou o diâmetro na base, como segunda variável preditora (Chhetri e Fowler, 1996). Teoricamente a variável altura pode ser medida em todas as árvores do povoamento. Contudo, do ponto de vista prático, isso pode, por vezes, tornar-se dispendioso e difícil de obter com precisão, como acontece nos povoamentos densos de folhosas onde não se consegue visualizar o topo. Nestes casos a determinação indirecta da altura total a partir de outra variável mais exacta e fácil de obter, como o diâmetro à altura do peito, pode ser considerada uma alternativa satisfatória à medição directa da altura (Myers e Belcher, 1981; Dolph, 1989). Podem também ser utilizadas para estimar as perdas referentes a causas naturais que danificam as árvores (Parresol, 1992) ou nos inventários florestais. Neste sentido, as funções hipsométricas desempenham um papel fundamental, tornando-se por isso indispensável conseguir equações altura-diâmetro mais precisas, na medida do possível, com vista à predição da altura em função do diâmetro medido, devido à sua grande utilidade na gestão florestal e nos modelos de crescimento e produção. Para melhorar as predições da altura e ajustar os modelos às diferenças entre povoamentos, os florestais têm usado variáveis

independentes adicionais como a idade (Curtis, 1967), o índice de qualidade da estação (SI) ou a área basal (Larsen e Hann, 1987; Wang e Hann, 1988), nas suas equações altura-diâmetro. Zeide e Vanderschaaf (2002) consideram que a densidade ajuda a explicar a variação na altura e por isso é necessário incluí-la nas relações altura-diâmetro.

Segundo Curtis (1967), as funções altura-diâmetro são usadas para a estimação do volume, para a descrição dos povoamentos e o seu desenvolvimento ao longo do tempo, para a obtenção de estimativas da altura média dos povoamentos, ou parte deles, e ainda para estimar o crescimento através de métodos de projecção do povoamento. Muitos modelos de crescimento e produção também necessitam do diâmetro e da altura como duas variáveis básicas de entrada, com a totalidade ou parte das alturas estimadas através dos diâmetros medidos (Burkhart *et al.*, 1972; Curtis *et al.*, 1981; Wykoff *et al.*, 1982).

Segundo Tomé (1988) podemos distinguir dois tipos de relações hipsométricas:

- relações hipsométricas locais, geralmente função apenas do diâmetro a  $1,30\text{ m}$ , ajustadas para aplicação ao povoamento onde se procedeu à colheita de dados, e eventualmente, a povoamentos semelhantes.

- relações hipsométricas gerais, função do diâmetro a  $1,30\text{ m}$  e de variáveis do povoamento tais como a altura e diâmetro dominantes, a idade e a densidade, desenvolvidas para aplicação generalizada a uma espécie numa determinada região.

No que se refere ao castanheiro, até à data, em Portugal, não foi feito nenhum estudo sobre relações hipsométricas gerais aplicável a esta espécie. As relações hipsométricas que se conhecem (Fortuna, 1969, Patrício, 1996, Costa, 1999, Garcia, 2003) são locais e referentes sobretudo ao castanheiro em regime de talhadia. Exceptuam-se Fortuna (1969) e Garcia (2003). O primeiro autor apresenta, além da talhadia, duas curvas hipsométricas locais para o alto fuste, efectuadas pelo método gráfico, para Moitas e Teixeiras bem como para o conjunto Souto do Concelho, Moitas e Teixeiras, no Concelho de Manteigas. Garcia (2003) procedeu ao ajustamento de relações hipsométricas locais para as parcelas jovens de castanheiro em alto fuste, instaladas no Concelho de Bragança, e por nós já referidas.

### ***Relações hipsométricas locais***

Ao longo dos tempos foram várias as funções aplicadas à modelação da relação altura-diâmetro com carácter local. A revisão bibliográfica efectuada por Curtis (1967)

reúne 13 das funções mais vulgarmente utilizadas para modelar a relação altura-diâmetro de carácter local. O autor compara a prestação das 13 funções locais altura-diâmetro, ajustadas a dados de *Pseudotsuga menziesii*, não tendo encontrado grandes diferenças entre os vários modelos. Neste mesmo estudo utilizou também a idade como variável independente, em modelos lineares altura-diâmetro, sugerindo, no caso de parcelas permanentes, que o ajustamento seja feito para o conjunto dos dados, tendo em conta a idade, em vez do ajustamento separado.

Desde então muitas outras equações foram desenvolvidas. Huang *et al.* (1992) testam 20 equações altura-diâmetro a um conjunto de dados da região de Alberta para vários grupos de espécies. Segundo estes autores, embora nenhuma destas 20 funções possa ser considerada superior ou inferior numa situação particular, em geral, estas equações são recomendadas desde que proporcionem baixos valores de  $SQR$ , valores significativos da estatística  $t$  e gráficos de resíduos studentizados satisfatórios. Por sua vez, Fang e Bailey (1998) seleccionam 33 equações potenciais para a modelação do crescimento altura-diâmetro e Huang *et al.* (2000) seleccionaram 27 funções potenciais altura-diâmetro para avaliação, igualmente para a região de Alberta, considerando eco-regiões. Todas estas equações podem ser escritas sob a forma geral:  $h_i = f(d_i, \beta) + \varepsilon_i$  onde  $h_i$  é a observação da variável dependente, altura da árvore  $i$  em  $m$ ,  $d_i$  é a variável independente, correspondente ao diâmetro a  $1,30 m$  da árvore  $i$  em  $cm$ ,  $\beta$  é o vector dos parâmetros que serão estimados, e  $\varepsilon_i$  o termo aleatório do erro.

Os modelos testados pelos diversos autores citados comportam um número de parâmetros que pode ir de 1 a 4.

Segundo Fang e Bailey (1998) os modelos de 4 parâmetros ganham muito pouco relativamente aos modelos de 3 parâmetros, quer na predição do enviesamento quer na precisão. A adição de um quarto parâmetro acarreta uma série de problemas pelo que não recomendam nenhum dos modelos de 4 parâmetros testados para as equações altura-diâmetro, até porque a sobreparameterização cria sensibilidade aos valores iniciais e a convergência é mais difícil de obter.

No Quadro 3.1 apresentam-se os modelos de simples entrada que melhor se aplicaram ao castanheiro, em Portugal, de acordo com a bibliografia consultada.

Quadro 3.1: Funções de aplicação local que melhor descreveram a relação altura-diâmetro para o castanheiro.

Função	Autor ou designação	Observações
$h=e^{\left(\beta_0+\beta_1\frac{1}{d}\right)}$	Michailoff (1943) <sup>(*)</sup>	<sup>(*)</sup> Seleção efectuada por Costa (1999) para talhadia de castanheiro na Serra da Padrela
$h=\frac{d^2}{\left(\beta_0+\beta_1d+\beta_2d^2\right)}+1,3$	Prodan (1951) <sup>(*)</sup>	
$h=\frac{d}{\left(\beta_0+\beta_1d\right)}$	Prodan (1965) <sup>(*)</sup>	<sup>(**)</sup> Seleção efectuada por Patrício (1996) para talhadia na Serra de Mogadouro
$h=\beta_0+\beta_1\frac{1}{d}+\beta_2d$	— <sup>(*)</sup> <sup>(**)</sup> <sup>(***)</sup>	
$h=\beta_0+\beta_1d+\beta_2d^2$	Trorey (1932) <sup>(**)</sup>	<sup>(***)</sup> Seleção efectuada por Garcia (2003) para alto fuste com idades entre os 4 e os 8 anos, em Rossas, Chãos, Laviados e Montesinho.
$h=e^{\beta_0}d^{\beta_1}$	Stoffels e Van Soest (1953) <sup>(**)</sup>	
$h=1,3+\left(\frac{1}{\beta_0+\beta_1\frac{1}{d}}\right)^{\beta_2}$	Petterson (1955) <sup>(**)</sup> <sup>(***)</sup>	
$h=e^{\beta_0}d^{\beta_1}e^{\beta_2(\log d)^2}$	Korsun (1935) <sup>(**)</sup>	
$h=\beta_0+\beta_1\log d$	Henricksen (1950) <sup>(***)</sup>	

O modelo Michailoff (1943) apresenta um comportamento biológico adequado desde que  $\beta_1 < 0$ , possui uma assíntota ( $e^{\beta_0}$ ) e um ponto de inflexão ( $-\beta_1/2$ ). Por sua vez o modelo Prodan (1951) apresenta uma forma adequada desde que  $\beta_0 > 0$  e  $\beta_1 > 0$  ou  $\beta_1 < 0$ , possui assíntota ( $1/\beta_1 + 1,3$ ), máximo ou mínimo e ponto de inflexão.

A função Prodan (1965) corresponde à equação da hipérbole. Tem comportamento biológico aceitável quando  $\beta_0 > 0$  e  $\beta_1 > 0$  e assíntota  $1/\beta_1$ .

O modelo “ $H = \beta_0 + \beta_1 1/d + \beta_2 d$ ” não tem ponto de inflexão nem assíntota, possui, no entanto, comportamento lógico do ponto de vista biológico.

O modelo Trorey (1932) não possui assíntota e apresenta comportamento biológico aceitável quando  $\beta_1 > 0$  e  $\beta_2 < 0$ , possui um máximo.

A função Stoffels e Van Soest (1953) não possui assíntota mas desde que  $0 < \beta_1 < 1$  apresenta um comportamento adequado do ponto de vista biológico.

O modelo Petterson (1955) possui assíntota  $h = ((1/\beta_0)^{\beta_2} + 1,3)$ , ponto de inflexão e comportamento biológico apropriado com  $\beta_0 > 0$  ou  $< 0$  e  $\beta_1$  e  $\beta_2 > 0$ .

A função Korsun (1935) não possui assíntota mas possui ponto de inflexão e comportamento lógico quando  $\beta_1 > 0$  e  $\beta_2 > 0$  ou  $< 0$ .

O modelo Henricksen também não possui assíntota, apresentando, no entanto, uma forma crescente para valores  $\beta_1 > 0$  que lhe confere carácter biológico apropriado.

### **Relações hipsométricas gerais**

Relativamente a esta matéria não é grande a variedade de funções utilizadas para estabelecer relações altura-diâmetro com carácter geral. No presente estudo testaram-se diversas funções hipsométricas gerais, referenciadas por diversos autores (Clutter *et al.*, 1983; Tomé, 1988; Carvalho, 1999; Soares e Tomé, 2002) para o efeito e apresentadas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2: Funções vulgarmente utilizadas na modelação de relações hipsométricas gerais.

<b>Função</b>	<b>Autor</b>
$h-h_0 = h_{dom}(1 + \beta_0 e^{\beta_1 h_{dom}})(1 - e^{-\beta_2 d/h_{dom}})$	Harrison <i>et al.</i> (1986)
$\ln h = \beta_0 + \beta_1 S_{h,t} + \beta_2 N/100 + \beta_3 1/t + \beta_4 1/d$	Bennett e Clutter (1968)
$\ln(h_{dom}/h) = \beta_0 + (1/d - 1/d_{max})(\beta_1 + \beta_2 \ln N + \beta_3 1/t + \beta_4 \ln h_{dom})$	Lenhart (1968)
$\ln h = \beta_0 + \beta_1 \ln h_{dom} + \beta_2 1/t + \beta_3 \ln N/d + \beta_4 1/(d t) + \beta_5 1/d$	Burkhart e Strub (1974)
$h = h_{dom} e^{\beta(1/d - 1/d_{dom})}$ , $\beta = f(\text{variáveis povoamento})$	Michailoff modificada por Tomé (1988)
$h = h_{dom} (d/d_{dom})^\beta$ , $\beta = f(\text{variáveis povoamento})$	Stoffels e Van Soest modificada por Tomé (1988)
$h = h_{dom} (1 + \beta h_{dom} (1/d - 1/d_{dom}))^{-1}$ , $\beta = f(\text{variáveis pov.})$	Prodan modificada por Tomé (1988)

Os modelos Bennett e Clutter (1968), Lenhart (1968) e Burkhart e Strub (1974) são de natureza empírica, com expressões matemáticas excessivamente complicadas que sugerem a existência de colinearidade (Tomé, 1988). O modelo de Harrison *et al.* (1986) foi deduzido com base na interpretação dos parâmetros do modelo de Meyer (1940) (Tomé, 1988; Soares e Tomé, 2002). Segundo os autores, a expressão matemática do modelo garante que a assíntota é próxima da altura dominante (podendo ser superior) e que a taxa de aumento da altura com o diâmetro é menor para maiores alturas dominantes. As três últimas equações do Quadro 3.2 foram deduzidas por Tomé (1988) por restrição das respectivas equações locais ao ponto (diâmetro dominante, altura dominante). As equações resultantes dependem somente de um

parâmetro expresso pela autora como uma combinação linear das variáveis do povoamento.

No nosso trabalho iremos desenvolver uma curva hipsométrica geral, uma vez que não se conhece nenhuma relação deste tipo para o castanheiro de alto fuste em Portugal, e porque é um instrumento necessário nos modelos de produção. Segundo Tomé (1988) nos modelos de produção utilizam-se com maior frequência as curvas hipsométricas gerais, embora se possa recorrer a uma curva hipsométrica local no caso da aplicação do modelo a uma região restrita.

### **3.1.2. Material e métodos**

Para a modelação da relação hipsométrica geral foram utilizados os dados dos povoamentos adultos de alto fuste localizados no Marão, Padrela (povoamento *C*), e Bornes, medidos na sua totalidade no período do repouso vegetativo de 2000/2001. Foram também utilizados os dados anteriores das parcelas permanentes dos povoamentos de Bornes (uma parcela de 500 m<sup>2</sup>, medida em 1990), do Marão (duas parcelas de 500 m<sup>2</sup> cada medidas em 1992), da Padrela (povoamento *A*, parcela de 1000 m<sup>2</sup> medida com 48 anos de idade) e, igualmente, da Padrela (povoamento *B*, parcela de 1000 m<sup>2</sup> medida em 2000), localizada no único alto fuste adulto com alguma dimensão que ainda se mantém nesta serra. Para além destes dados de alto fuste adulto, utilizaram-se também os dados disponíveis provenientes de parcelas permanentes localizadas em povoamentos jovens de castanheiro de alto fuste. Assim, utilizámos os dados das parcelas puras de castanheiro, utilizadas como controlo no ensaio de consociação com a pseudotsuga, localizado em Bemlhevai, Concelho de Vila Flor. Relativamente a este ensaio foram utilizados os dados de medições sucessivas referentes a 1988, 1992, 1996, 1998 e 2000. Para além destas parcelas foram utilizados os dados recolhidos nas 15 parcelas permanentes, instaladas em 2002, em povoamentos jovens no concelho de Bragança. O número total de observações do par (diâmetro, altura) é de 4 978.

Para efeitos de validação dos modelos altura diâmetro este conjunto de dados foi dividido em dois subconjuntos aleatórios, ambos usados quer para ajustamento quer para validação (validação cruzada) com 3 048 e 1 930 observações, respectivamente. A partição casual foi feita ao nível da parcela e não ao nível das datas de medição ou das árvores consideradas individualmente, para garantir que todos os indivíduos de uma determinada parcela permanecessem no mesmo conjunto de dados de forma a manter o mais possível a independência dos dois subconjuntos. Para assegurar que a partição dos

dados não foi afectada por padrões sistemáticos, as equações seleccionadas com um conjunto de dados foram avaliadas com o segundo grupo e vice-versa. Um procedimento semelhante foi utilizado por Soares e Tomé (2002) na modelação de relações hipsométricas para o eucalipto. O modelo finalmente seleccionado foi ajustado à totalidade dos dados. Paralelamente a este processo recorreu-se à utilização da estatística *PRESS*, descrita no ponto 2.1.4.3, nomeadamente a média dos resíduos *PRESS* (*mPRESS*), a média do valor absoluto dos resíduos *PRESS* (*maPRESS*) e o  $R^2$  de predição ( $R^2_{pred}$ ), como forma de validação cruzada múltipla. O procedimento utilizado no ajustamento e selecção dos modelos é em tudo semelhante ao usado no Capítulo II.

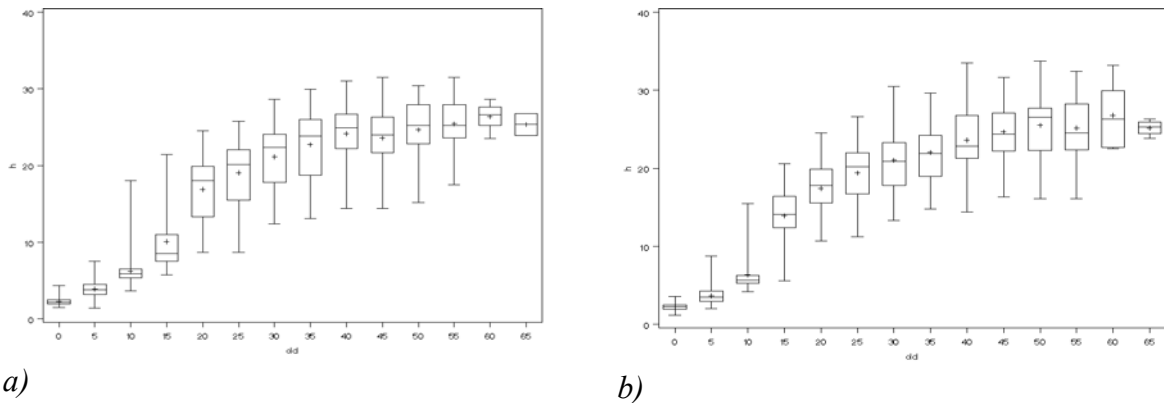
Os conjuntos de dados de ajustamento e de validação são caracterizados no Quadro 3.3.

Quadro 3.3: Caracterização dos dois subconjuntos de dados de ajustamento e validação usados para a modelação de relações hipsométricas gerais.

Variável	Subconjunto de dados 1 (n = 3048)				Subconjunto de dados 2 (n = 1930)			
	Mín.	Média	Max.	s	Mín.	Média	Max.	s
h (m)	1,5	7,3	31,5	7,3	1,4	8,5	33,7	8,5
d (cm)	0,5	10,3	62,2	12,5	0,3	12,4	65,0	14,8
t (anos)	3,0	17,1	65,0	20,2	3,0	21,8	65,0	24,0
N	78,8	1004,7	1480,0	319,8	160,0	947,7	2133,3	367,4
SI (m)*	13,1	24,6	29,3	3,6	13,0	23,9	29,6	4,5
dg (cm)	1,7	10,7	51,8	11,8	1,5	12,9	46,9	14,2
h <sub>dom</sub> (m)	2,5	8,6	29,9	7,7	2,7	9,9	29,7	8,8
d <sub>dom</sub> (cm)	2,3	14,8	57,1	14,6	2,5	17,3	57,1	17,4

\* definido para uma idade padrão de 45 anos; s, desvio padrão; N, número de árvores por hectare.

O desenvolvimento observado da altura por classes de diâmetro, dos dados usados para a construção da curva hipsométrica geral, é caracterizado através dos diagramas de extremos e quartis apresentados na Figura 3.1. Como se pode observar verifica-se um aumento da variabilidade da altura observada por classe de diâmetro à medida que as árvores atingem maior dimensão.



a) b)  
 Figura 3.1: Diagramas de extremos e quartis, da altura  $h$  (m) observada por classe de diâmetro  $d$  (cm), para os subconjuntos de dados 1 e 2, designados por a) e b), respectivamente.

### 3.1.3. Modelos candidatos

Numa primeira fase foram considerados para teste todos os modelos sob a forma geral  $h_i = f(d_i, \beta) + \varepsilon_i$ , apresentados no Anexo II, onde  $h_i$  (variável dependente) é a observação da altura total da árvore  $i$  em m,  $d_i$  (variável independente) é a observação do diâmetro à altura do peito da árvore  $i$  em cm,  $\beta$  o vector dos parâmetros que se pretendem estimar e  $\varepsilon_i$  o factor aleatório do erro.

Examinámos assim modelos não lineares e lineares simples e múltiplos, para verificar qual a função mais adequada à predição da altura total a partir da variável diâmetro para o castanheiro. Foi utilizada também uma análise exploratória por regressão linear múltipla pelo método Stepwise com um nível de significância  $\alpha = 0,05$  como critério de entrada e permanência no modelo. A análise exploratória foi efectuada com variáveis do povoamento como a idade, dimensões da árvore: diâmetro e altura, dimensão média da árvore: diâmetro máximo e diâmetro quadrático médio, bem como variáveis que representam a densidade do povoamento e a produtividade da estação como o número de árvores por hectare e a altura dominante.

Os modelos relativos às curvas hipsométricas gerais apresentados anteriormente no Quadro 3.2 foram igualmente considerados no ajustamento das funções aos dados altura-diâmetro obtidos.

A generalidade dos modelos apresentados no Anexo II revelou uma qualidade do ajustamento bastante inferior à maior parte dos modelos considerados no Quadro 3.2. Por outro lado, as funções resultantes de regressão linear múltipla, com a altura como variável dependente, revelaram um elevado número de variáveis seleccionadas e, em consequência, multicolinearidade elevada com valores de  $VIF$  muito superiores a 15,

este último calculado da seguinte forma:  $VIF_i = 1/(1-R_i^2)$ , onde  $R_i^2$  representa o coeficiente de determinação múltiplo produzido quando se regride a variável  $x_i$  sobre as outras variáveis regressoras  $x_j$  ( $j \neq i$ ).

Estes modelos embora apresentassem valores de  $R^2$  e  $R^2_{ajustado}$  mais elevados, relativamente aos anteriores, foram afastados preferindo-se continuar o estudo da relação altura-diâmetro considerando apenas as funções que apresentaram melhor desempenho nesta primeira fase.

Assim, foram consideradas para o estudo as melhores funções não lineares que expressam a relação altura-diâmetro, incluindo diferentes versões das equações de Michailoff e Harrison, com diferentes formulações dos parâmetros em função de variáveis do povoamento. Os modelos considerados na análise são apresentados no Quadro 3.4.

Quadro 3.4: Equações altura-diâmetro utilizadas como modelos candidatos na modelação das curvas hipsométricas gerais para o castanheiro.

Função	Autor
H1. $h-h_0 = h_{dom}(1 + \beta_0 e^{\beta_1 h_{dom}})(1 - e^{-\beta_2 d/h_{dom}})$	Harrison <i>et al.</i> (1986)
H2. $h = h_{dom}(1 + (\beta_0 + \beta_1 N/1000 + \beta_2 d_{max})e^{\beta_3 h_{dom}})(1 - e^{-\beta_4 d/h_{dom}})$	<i>Idem</i>
H3. $h = h_{dom}(1 + (\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 h_{dom} + \beta_3 d_g)e^{\beta_4 h_{dom}})(1 - e^{-\beta_5 d/h_{dom}})$	<i>idem</i>
M1. $h = h_{dom} e^{\beta(1/d-1/ddom)}$ , $\beta = f(\text{variáveis povoamento})$	Michailoff modif. por Tomé (1988)
M2. $h = h_{dom} e^{(\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 h_{dom} + \beta_3 d_g)(1/d-1/ddom)}$	<i>idem</i>
M3. $h = h_{dom} e^{(\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 N/1000 + \beta_3 h_{dom})(1/d-1/ddom)}$	<i>idem</i>
S1. $h = h_{dom}(d/d_{dom})^\beta$ , $\beta = f(\text{variáveis povoamento})$	Stoffels e Van Soest modif. por Tomé (1988)
P1. $h = h_{dom}(1 + \beta h_{dom}(1/d-1/d_{dom}))^{-1}$ , $\beta = f(\text{variáveis pov.})$	Prodan modif. por Tomé (1988)

### 3.1.3.2. Critérios utilizados no ajustamento e selecção de um modelo

O ajustamento das funções apresentadas no Quadro 3.4 ao conjunto de dados foi efectuado com base no método dos mínimos quadrados não lineares (*OLS*). Para tal, recorreu-se ao procedimento *PROC NLIN* do programa (*SAS/STAT*) com o método iterativo de minimização de Gauss-Newton. Repetiu-se este procedimento para os subconjuntos de dados 1 e 2 e posteriormente para a totalidade dos dados. Também aqui o ajustamento e consequente verificação dos pressupostos pôs em evidência a não normalidade dos resíduos e a heterocedasticidade dos mesmos, pelo que se seguiu um procedimento em tudo semelhante ao usado no Capítulo II, em condições análogas. Assim, recorreu-se à regressão dos mínimos quadrados não lineares ponderada

iterativamente “iteratively reweighted least squares” (*IRWLS*) com recurso à função de Huber com um valor limite de  $r = 1$ . Devido aos resíduos ordinários serem intrinsecamente não independentes e não terem variância comum, são usados os resíduos studentizados.

Em virtude da heterogeneidade da variância detectada através da análise dos resíduos studentizados, os quais demonstraram um padrão comum de variação crescente com o aumento dos valores da variável dependente (altura), foi utilizado um factor de ponderação igual ao inverso da altura dominante ( $1/h_{dom}$ ) a qual faz parte das variáveis independentes dos modelos ajustados. Quando o problema da variância do erro desigual ocorre a regressão não linear ponderada é aplicável, com uma selecção de pesos inversamente proporcionais à variância do termo do erro (Huang *et al.*, 1992). A transformação da variável dependente é muitas vezes utilizada para estabilizar a variância. No entanto, Larsen e Hann (1987) verificaram que os resíduos das equações altura-diâmetro log-transformadas não são normalmente distribuídos. Estes autores preferem também a regressão ponderada à transformação logarítmica. Segundo Fang e Bailey (1998) os modelos ajustados após transformação de linearização têm grandes erros médios e tendem a produzir estimativas enviesadas devidas aos erros de transformação. Por outro lado, Curtis (1967) refere que a transformação logarítmica é primariamente um expediente que facilita o ajustamento (talvez, na actualidade, já não se justifique), o qual não resulta necessariamente em homocedasticidade ou normalidade.

O recurso à estimação dos parâmetros por *IRWLS* para resolver a não normalidade dos erros, como já se referiu, usa um processo iterativo com um valor inicial escolhido e continuamente melhorado até à soma de quadrados do erro ponderada ser minimizada, com a conseqüente alteração das estimativas dos parâmetros e dos erros padrões das estimativas relativamente aos valores obtidos na ausência de ponderação. Embora existam muitos procedimentos para aproximar o peso ou implementar o método dos mínimos quadrados generalizados (Gallant, 1987; Judge *et al.*, 1988), um procedimento simples baseado na análise gráfica dos resíduos studentizados pode ser igualmente eficiente. Os resíduos studentizados são a versão escalada dos resíduos que são obtidos pela divisão de cada resíduo ordinário por uma estimativa do seu desvio padrão. Huang *et al.* (1992) utilizam como factor de ponderação  $w_i = 1/d_i^k$  com  $k=1$ , onde  $d_i$  representa o diâmetro à altura do peito, enquanto

Huang *et al.* (2000) utilizam  $w_i=1/\hat{h}_i^k$  com  $k=3/2$ , onde  $\hat{h}_i$  é a altura estimada para a observação  $i$  do modelo ajustado.

### 3.1.3.2.1. Avaliação e selecção dos modelos

Foram utilizados diferentes critérios para avaliar o desempenho das funções altura-diâmetro, quer relativamente à qualidade do ajustamento, quer à sua capacidade preditiva. Relativamente à qualidade do ajustamento foi avaliada: a significância e estabilidade dos parâmetros, o quadrado médio do erro ponderado do modelo (*QMR*), a eficiência de modelação (*EM*) e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajust}$ ). No que se refere à capacidade preditiva e enviesamento do modelo foi considerado: o  $R^2$  de predição ( $R^2_{pred}$ ), a média dos resíduos *PRESS* (*mPRESS*), a média dos valores absolutos dos resíduos *PRESS* (*maPRESS*), valores dos percentis de distribuição dos resíduos *PRESS* 95 % (*P95*) e 5 % (*P5*), os gráficos dos resíduos studentizados em função da altura estimada e, para análise da normalidade do erro do modelo, os gráficos em papel de probabilidades normal “QQ plot” dos resíduos studentizados. Para uma função apropriada os limites de confiança dos parâmetros estimados não podem conter o valor zero, caso contrário o parâmetro não será significativamente diferente de zero, e o *QMR* deve ser pequeno, bem como a *mPRESS* e a *maPRESS*, as quais se devem aproximar o mais possível do valor zero. Estas estatísticas foram definidas no capítulo anterior, à excepção do  $R^2_{ajust}$ . Assim, o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajust}$ ) é definido da seguinte forma:

$$R^2_{ajust} = 1 - \frac{SQR/(n-p')}{SQT/(n-1)} = 1 - \frac{n-1}{n-p} (1 - R^2),$$

Onde: *SQR* é a soma dos quadrados dos resíduos, *SQT* a soma de quadrados total,  $n$  o número total de observações,  $p$  o número de parâmetros do modelo e  $R^2$  o coeficiente de determinação. O  $R^2_{ajust}$ , ao contrário do  $R^2$ , considera o número de variáveis independentes utilizado no modelo e pode diminuir com a adição de novas variáveis. Esta diminuição ocorre quando  $n-p'$  decresce mais rapidamente do que a soma de quadrados dos resíduos (*SQR*). Desta forma o  $R^2_{ajust}$  dá indicação do número de variáveis do modelo a partir do qual a adição de uma nova variável contribui muito pouco para a explicação da variação total de  $y$ .

O gráfico dos resíduos studentizados em função dos valores estimados deve apresentar variância aproximadamente homogénea sobre a totalidade dos valores

preditos. Qualquer outro padrão pode indicar enviesamento, variância desigual, ou outros problemas como “outliers” ou subespecificação do modelo.

Para além destas estatísticas foi analisada a presença de colinearidade, nos modelos lineares com base no número de condição da matriz de correlação entre as variáveis explanatórias  $X^*X^*$  (*NCOND*), sendo  $X^*$  a matriz dos dados centrada e escalada. Nos modelos não lineares o número de condição refere-se à matriz  $W'W$ , sendo  $W$  a matriz das derivadas parciais em ordem a cada um dos parâmetros calculada para a solução. Segundo Myers (1986) a multicolinearidade pode ser medida em termos da razão entre o maior e o menor valor próprio a qual é designada por número de condição da matriz de correlação (*NCOND*) que pode ser expressa da seguinte forma:

$$\varphi = \lambda_{max}/\lambda_{min}.$$

Elevados valores de  $\varphi$  são uma indicação de multicolinearidade o que evidencia instabilidade dos coeficientes de regressão. Segundo Myers (1986), o número de condição da matriz *NCOND* não deve exceder o valor 1000.

No modelo finalmente seleccionado um dos parâmetros foi expresso como uma combinação linear das variáveis do povoamento: índice de qualidade da estação *SI*, idade *t*, e número de árvores por hectare *N*.

$$\beta = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 N + \beta_3 SI.$$

Para tal, foram consideradas estas variáveis e analisada a sua significância para verificar se os respectivos coeficientes eram ou não significativamente diferentes de zero.

#### **3.1.4. Resultados e discussão**

Os modelos apresentados no ponto 3.1.3. foram ajustados aos subconjuntos de dados 1 e 2 obtidos pelo processo descrito anteriormente. Durante a fase de ajustamento a equação de Harrison nas versões *H2* e *H3* apresentou alguns problemas de convergência, nomeadamente no que se refere à estimativa do erro padrão assintótico e limites de confiança dos parâmetros do modelo. Por esta razão as versões atrás mencionadas foram excluídas antecipadamente, permanecendo em análise seis equações para a selecção do modelo final altura-diâmetro.

A análise das estatísticas de ajustamento e predição utilizadas para a selecção do melhor modelo conduziu, nos dois subconjuntos de dados considerados, a resultados bastante semelhantes no que se refere à ordenação dos modelos. Em ambas as situações são seleccionados como melhores, por ordem crescente, os modelos: *P1*, *SI*, *M2*, *M3*,

*H1* e *M1*, embora por vezes com diferenças muito ténues entre eles. O modelo *S1* é superior aos modelos *M2* e *M3* na fase de ajustamento sendo ultrapassado por estes em algumas estatísticas de predição, como se pode ver no Quadro 3.5. Esta seriação mantém-se na generalidade quando se ajustam os modelos à totalidade dos dados.

Durante a fase de ajustamento a análise da significância dos parâmetros revelou alguns coeficientes não significativos, pelo que os modelos implicados foram reajustados apenas com os restantes parâmetros. Este procedimento manteve-se em todas as situações análogas.

Quadro 3.5: Resultados da avaliação do ajustamento e predição dos modelos com os dois subconjuntos de dados.

Função	Subconj.	R <sup>2</sup> ajust	QMR	R <sup>2</sup> pred	mPRESS	maPRESS
H1	1	0,9605	0,0878	0,9623	0,0041	0,8438
	2	0,9765	0,0754	0,9668	-0,0266	0,8839
M1	1	0,9420	0,1463	0,9271	-0,5054	1,0810
	2	0,9516	0,1698	0,9244	-0,5136	1,2170
M2	1	0,9678	0,0730	0,9659	-0,0577	0,7866
	2	0,9784	0,0678	0,9683	0,0328	0,8549
M3	1	0,9685	0,0716	0,9663	-0,0554	0,7790
	2	0,9783	0,0681	0,9684	0,0244	0,8545
P1	1	0,9694	0,0690	0,9663	-0,0354	0,7670
	2	0,9794	0,0641	0,9681	0,0560	0,8372
S1	1	0,9716	0,0630	0,9656	0,0426	0,7517
	2	0,9788	0,0657	0,9637	0,1441	0,8646

Se considerarmos a validação cruzada, ou seja, a avaliação com o subconjunto de dados *1* das equações ajustadas com o subconjunto *2* e vice-versa (*vide* Quadro 3.6), obtém-se uma selecção análoga para os melhores modelos que continuam a ser *P1* e *S1*, apresentando o modelo *P1* um erro médio de predição bastante reduzido nos dois subconjuntos de dados. Por sua vez o modelo *S1* é superior a este último no subconjunto *1* mas perde vantagem no subconjunto *2*, embora a diferença seja pequena. Os modelos são enviesados, uns por excesso, outros por defeito, mas o enviesamento é muito baixo para a generalidade das funções. O erro absoluto médio é inferior a *1 m* na maioria dos casos.

Como já se referiu, a análise dos modelos com base na qualidade do ajustamento e capacidade preditiva dos mesmos, para a totalidade dos dados, proporcionou uma selecção semelhante à obtida com os dois subconjuntos de dados. Desta forma a validação cruzada múltipla, baseada na estatística *PRESS*, conduziu a uma selecção dos

melhores modelos idêntica à obtida com os dois subconjuntos de dados por validação cruzada.

Quadro 3.6: Medidas de predição resultantes do processo de validação cruzada para as equações com melhor desempenho.

Função	Medidas de enviesamento		Medidas de precisão	
	$\sum (y - \hat{y}) / n$ (m)	s	$\sum  (y - \hat{y})  / n$ (m)	s
Avaliação com o subconjunto 1 da equação ajustada com o subconjunto 2 (n=3048)				
H1	-0,132	1,417	0,852	1,139
M1	-0,486	1,899	1,080	1,636
M2	-0,115	1,339	0,784	1,091
M3	-0,125	1,343	0,785	1,097
P1	-0,061	1,339	0,766	1,099
S1	0,024	1,350	0,751	1,121
Avaliação com o subconjunto 2 da equação ajustada com o subconjunto 1 (n=1930)				
H1	0,118	1,574	0,910	1,289
M1	-0,532	2,273	1,218	1,992
M2	0,122	1,508	0,859	1,245
M3	0,134	1,512	0,870	1,244
P1	0,084	1,506	0,837	1,255
S1	0,165	1,604	0,864	1,361

S, desvio padrão.

Os gráficos de resíduos foram igualmente incluídos na análise da qualidade do ajustamento dos modelos com vista à detecção de anomalias nos pressupostos da regressão. Assim, a hipótese de normalidade dos resíduos studentizados foi rejeitada para todas as funções, o que significa, do ponto de vista prático, que os testes de hipóteses associados às estimativas dos parâmetros não são válidos. No entanto, os histogramas de resíduos e os gráficos em papel de probabilidades normal para os resíduos studentizados “QQ plot”, exemplificados aqui para o modelo *P1* aplicado à totalidade dos dados, após ponderação com a função de Huber com  $r=1$  e  $1/h_{dom}$  (Fig. 3.2 e 3.3), não se afastam muito do padrão de normalidade. Os gráficos relativos aos dois subconjuntos de dados apresentam a mesma tendência.

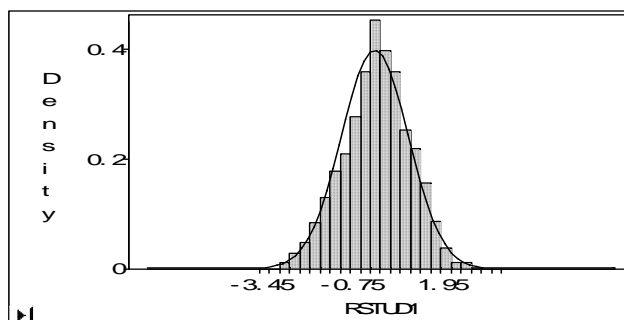


Figura 3.2: Histograma dos resíduos studentizados do modelo Prodan modificado, após ponderação (função *Huber* e  $1/h_{dom}$ ), para a totalidade dos dados.

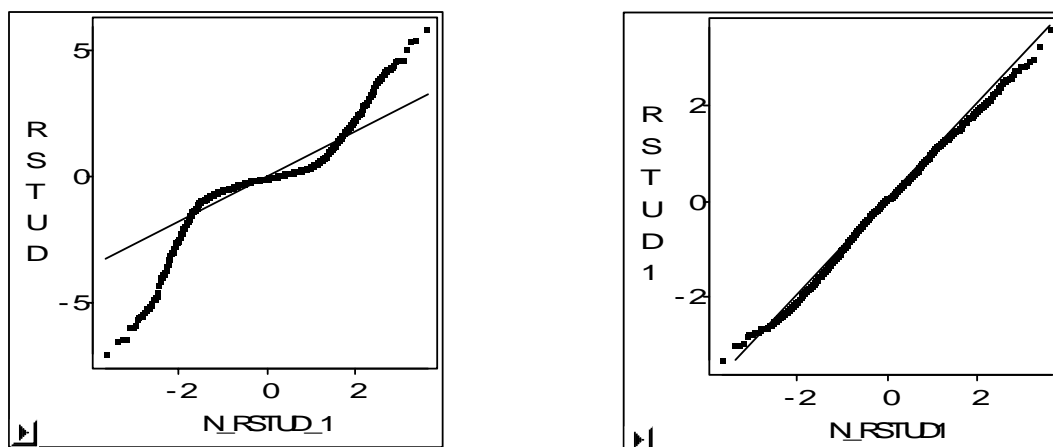


Figura 3.3: Gráficos dos resíduos studentizados em papel de probabilidades normal obtidos com o modelo Prodan modificado, antes (*RSTUD*) e depois (*RSTUD1*) da ponderação efectuada (função influência de *Huder* e  $1/h_{dom}$ ), para a totalidade dos dados.

A homogeneidade da variância foi avaliada graficamente através da análise dos gráficos de resíduos studentizados *vs.* altura estimada, os quais apresentaram uma distribuição sem qualquer padrão sistemático associado ao termo do erro (*vide* Fig. 3.4). No entanto, é notória uma diminuição de resíduos correspondentes aos pares de valores (altura, diâmetro) entre os 10 a 15 m de altura. Esta aparente separação dos resíduos é devida ao pequeno número de observações nesta faixa de alturas na base de dados por falta de povoamentos de castanheiro de alto fuste com estas características. As parcelas jovens de castanheiro instaladas permitirão, no futuro, colmatar esta falha e proporcionar assim uma melhoria da capacidade preditiva dos modelos.

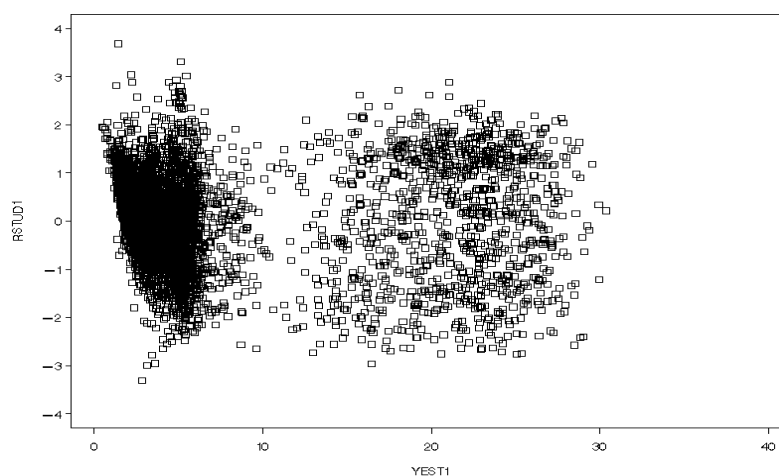


Figura 3.4: Gráfico dos resíduos studentizados *vs.* altura estimada, para o modelo Prodan modificado, após ponderação (função influência de *Huder* e  $1/h_{dom}$ ), para a totalidade dos dados.

Para as duas melhores funções, *PI* e *SI*, previamente seleccionadas para modelar o crescimento em altura do castanheiro de alto fuste em função do diâmetro, testou-se a hipótese do parâmetro  $\beta$  (parâmetro único em ambas as equações) ser função de variáveis representativas do povoamento como a idade *t*, a densidade *N* e a produtividade da estação *SI*:

$$\beta = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 N + \beta_3 SI.$$

Após a análise da significância dos parâmetros obtiveram-se as seguintes expressões:

$$\text{Modelo P1a: } \beta = \beta_0 + \beta_2 N + \beta_3 SI ;$$

$$\text{Modelo S1a: } \beta = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 N + \beta_3 SI .$$

Embora as variáveis incluídas nas expressões anteriores contribuam significativamente para o aumento da capacidade preditiva dos modelos, elas explicam apenas uma pequena parte do termo do erro (*vide* Quadro 3.7). De qualquer forma verifica-se uma ligeira superioridade dos modelos com a inclusão destas variáveis no parâmetro  $\beta$ , relativamente à sua não inclusão. Os modelos assim obtidos foram comparados com os anteriores, ajustados, em ambas as situações, à totalidade dos dados (Quadro 3.7).

Quadro 3.7: Estatísticas de ajustamento e predição dos modelos com melhor desempenho para a curva hipsométrica geral, após ponderação (função influência de *Huder* e *1/hdom*), para a totalidade dos dados.

Modelo	QMR	EM	mPRESS	maPRESS	R <sup>2</sup> <sub>pred</sub>	P95	P5
H1	0,084	0,968	-0,028	0,865	0,964	2,055	-2,160
M1	0,153	0,947	-0,517	1,139	0,925	1,273	-4,552
M2	0,071	0,972	-0,028	0,814	0,967	2,216	-1,888
M3	0,071	0,972	-0,032	0,812	0,967	2,200	-1,890
P1	0,067	0,974	-0,001	0,797	0,967	2,112	-2,003
S1	0,064	0,975	0,081	0,797	0,965	2,568	-1,665
P1a	0,066	0,974	0,007	0,785	0,968	2,073	-1,849
S1a	0,062	0,976	0,047	0,778	0,966	2,239	-1,776

EM, eficiência de modelação; P95, percentil 95; P5, percentil 5; mPRESS e maPRESS, média e média do valor absoluto dos resíduos PRESS; QMR, quadrado médio dos resíduos.

Os valores médios da análise do enviesamento e precisão dos melhores modelos obtidos ( $PI$ ,  $SI$ ,  $PIa$  e  $SIa$ ), por classes de idade  $t$ , densidade  $N$  e qualidade  $SI$ , são apresentados no Quadro 3.8.

A precisão dos modelos diminui com o aumento da idade, o que demonstra a influência da qualidade da base de dados usada no seu ajustamento, uma vez que os erros, cometidos na medição das alturas, aumentam à medida que o povoamento se desenvolve, sendo superiores para os povoamentos adultos. Os modelos, de uma maneira geral, são enviesados negativamente para as classes de idade dos 15 aos 25 e dos 45 aos 55 anos, ou seja, sobrestimam a altura para estas classes e subestimam para as restantes. A classe dos 25 aos 35 anos não apresenta valores devido à inexistência de povoamentos de alto fuste de castanheiro com estas idades.

Analisando o desempenho dos modelos relativamente à classe de qualidade verifica-se, duma maneira geral, uma tendência para uma diminuição da precisão com a diminuição da classe de qualidade. Por outro lado, os modelos sobrestimam a altura para as classes de qualidade inferiores a 15, entre 17 e 19, 21 e 23 e superiores a 26 e subestimam-na nas restantes classes.

No que se refere à densidade verifica-se que todos os modelos são mais precisos para densidades entre as 750 e 1 750 árvores por hectare. O modelo  $PI$  é menos enviesado do que o modelo  $SI$ , e as versões  $PIa$  e  $SIa$  menos enviesadas que os modelos  $PI$  e  $SI$ . Os modelos subestimam para densidades entre as 250 e as 1 250 árvores por hectare e sobrestimam para densidades entre 1 250 e 1 750. Nas restantes classes é menos nítida esta tendência.

Assim, duma maneira geral, os modelos  $PI$  e  $SI$  são inferiores aos modelos  $PIa$  e  $SIa$ . Por sua vez, quando se considera a análise por classes de idade e densidade dos modelos  $PIa$  e  $SIa$ , o modelo  $PIa$  revela-se ligeiramente superior ao modelo  $SIa$ . Por outro lado, o modelo  $SIa$  mostra-se ligeiramente superior na análise por classes de qualidade. A frequência dos erros médios de maior grandeza é superior no modelo  $SIa$ , pelo que a nossa selecção recai sobre o modelo  $PIa$ , embora qualquer um deles possa ser utilizado, bem como os seus homólogos  $PI$  e  $SI$ . O modelo  $PIa$  apresenta ainda a vantagem de não utilizar a idade como variável preditora difícil de obter em inventários florestais.

Modelos seleccionados:

$$\text{Modelo P1: } h = h_{dom} (1 + 0,5167 h_{dom} (1/d - 1/d_{dom}))^{-1}$$

$$\text{Modelo P1a: } h = h_{dom} (1 + (0,8601 + 0,000113N - 0,01865SI) h_{dom} (1/d - 1/d_{dom}))^{-1}$$

Quadro 3.8: Média dos resíduos de predição e média do valor absoluto dos resíduos de predição, por classes de idade, densidade e classe de qualidade, para a totalidade dos dados.

Mod.	t < 15 (n=3383)	15 ≤ t < 25 (n=456)	25 ≤ t < 35 (n=0)	35 ≤ t < 45 (n=76)	45 ≤ t < 55 (n=254)	t ≥ 55 (n=809)		
P1	0,050  0,365	-0,351  0,616	-	0,427  1,229	-0,258  1,841	0,020  2,338		
P1a	0,017  0,364	-0,165  0,563	-	0,657  1,288	-0,154  1,775	0,052  2,312		
S1	0,018  0,331	-0,191  0,582	-	0,344  1,226	-0,267  2,041	0,581  2,438		
S1a	0,034  0,330	-0,032  0,541	-	0,664  1,299	-0,256  1,907	0,181  2,381		
Mod.	N < 250 (n=244)	250 ≤ N < 750 (n=631)	750 ≤ N < 1250 (n=3380)	1250 ≤ N < 1750 (n=691)	1750 ≤ N < 2250 (n=32)			
P1	-0,134  2,553	0,135  2,179	0,032  0,422	-0,150  0,607	-0,930  2,249			
P1a	0,117  2,468	0,056  2,182	0,020  0,440	-0,145  0,556	0,080  1,825			
S1	0,270  2,546	0,723  2,350	0,026  0,391	-0,168  0,588	-1,388  2,539			
S1a	0,123  2,522	0,217  2,265	0,034  0,420	-0,073  0,505	0,068  1,795			
Mod.	SI < 15 (n=256)	15 ≤ SI < 17 (n=77)	17 ≤ SI < 19 (n=386)	19 ≤ SI < 21 (n=159)	21 ≤ SI < 23 (n=535)	23 ≤ SI < 25 (n=435)	25 ≤ SI < 27 (n=1656)	SI ≥ 27 (n=1474)
P1	-0,450  1,133	0,071  2,105	-0,234  1,409	0,460  1,809	-0,348  1,502	0,288  0,741	0,150  0,552	-0,046  0,437
P1a	-0,159  1,098	0,267  2,085	-0,084  1,363	0,520  1,819	-0,245  1,476	0,263  0,724	0,113  0,547	-0,113  0,436
S1	-0,181  1,065	0,562  2,074	0,024  1,362	1,014  2,086	-0,104  1,531	0,292  0,752	0,158  0,565	-0,067  0,404
S1a	-0,124  1,050	0,270  2,028	-0,008  1,335	0,764  2,000	-0,168  1,500	0,203  0,693	0,131  0,556	-0,060  0,399

### 3.1.5. Conclusões

Os modelos seleccionados para a curva hipsométrica geral são os modelos **P1a** e **P1** que a seguir se apresentam:

$$\text{Modelo P1: } h = h_{dom} (1 + 0,5167 h_{dom} (1/d - 1/d_{dom}))^{-1} \quad EM=0,974$$

$$\text{Modelo P1a: } h = h_{dom} (1 + (0,8601 + 0,000113 N - 0,01865 SI) h_{dom} (1/d - 1/d_{dom}))^{-1}$$

Estes modelos estimam a altura total  $h$  (m) em função de  $h_{dom}$  (m),  $d$  e  $d_{dom}$  (cm) ou em função destas variáveis juntamente com a densidade (número de árvores por hectare) e do índice de qualidade da estação  $SI_{45}$ .

Apesar da superioridade do modelo **P1a**, a sua utilização prática pressupõe a utilização de um maior número de variáveis independentes para a estimação da altura, com um ganho ligeiro em termos de precisão. Porém quando usado em modelos de produção poderá acarretar um maior erro. Por esta razão aconselha-se o modelo **P1a**

para a cubagem de povoamentos por meio de equações e de tabelas em que não se disponha de medições de alturas suficientes e o modelo **PI**, sempre que não se disponha de informação relativa aos povoamentos para todas as variáveis necessárias. Nos modelos de produção será preferível a utilização do modelo **PI** para estimar o volume das árvores e dos respectivos povoamentos, por implicar uma menor propagação de erros.

Quando a variável diâmetro dominante não estiver disponível, como acontece nas tabelas de produção, poder-se-á utilizar a equação que a seguir se apresenta para estimar a altura:

$$\text{Modelo H1: } h = h_{dom}(1 + 0,0607e^{-0,0228 h_{dom}})(1 - e^{-1,6676 d/h_{dom}}) \quad EM=0,968$$

Esta equação, embora ligeiramente inferior à equação seleccionada, possui ainda um bom desempenho para a estimação da altura total.

## CAPÍTULO IV

### ESTIMAÇÃO DO VOLUME TOTAL, DO VOLUME PERCENTUAL E MODELAÇÃO DO PERFIL DO TRONCO

#### 4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O volume de uma árvore é uma característica dendrométrica fundamental, servindo de base à estimação em valor e às diversas operações de comercialização da madeira. Contudo, a sua determinação não é tarefa fácil, implicando inevitavelmente elevados custos para a sua obtenção. Por esta razão as equações e tabelas de volume que disponibilizam estimativas desta variável em função de variáveis dendrométricas habitualmente medidas na árvore, como o diâmetro a *1,30 m* de altura e a altura total ou mercantil, são de grande importância para o estudo e previsão da produção florestal.

Todos os métodos para a estimação do volume dos povoamentos pressupõem, pelo menos na fase do seu desenvolvimento, a determinação directa do volume das árvores individuais em amostras representativas dos povoamentos, quer em árvores abatidas quer em árvores em pé. O volume do povoamento é obtido pela soma dos volumes individuais das árvores que o constituem, normalmente reportado ao hectare.

Na prática moderna, são usadas geralmente equações para estimar o volume das árvores em vez de se obterem os valores a partir de tabelas (Avery e Burkhardt, 1994). Contudo, o termo tabela de volume tem persistido na prática florestal como um termo genérico, significando quer a forma tabular, quer as equações de predição do volume individual que as originam. Assim, convencionalmente, qualquer equação de predição do volume é referida como uma tabela de volume e o termo tabela de volume é geralmente definido como uma função, tabela ou gráfico que pode ser usado para estimar o volume das árvores de um povoamento a partir das variáveis dendrométricas diâmetro à altura do peito, altura e forma (Clutter *et al.*, 1983). Estas variáveis biométricas estão bem correlacionadas com a variável preditora, proporcionando estimativas do volume bastante fiáveis.

As tabelas de volume apresentadas sob a forma de quadro numérico têm na sua génese modelos de regressão que permitem estimar o volume de uma árvore – ou antes o volume médio individual de um conjunto de árvores - em função de uma ou de diversas variáveis dendrométricas directamente medidas na árvore, pelo que são consideradas instrumentos de estimação indirecta do volume das árvores.

O princípio base de uma tabela de volume foi, segundo Rondeux (1993), definido por Cotta em 1817 e assenta no facto das árvores da mesma espécie, com o mesmo diâmetro, a mesma altura e a mesma idade, tendo crescido em estações semelhantes, apresentarem volumes idênticos, com pequenas oscilações em torno de um volume médio que pode ser exactamente determinado.

As tabelas de volume têm um carácter estático, no entanto, as equações que lhe estão subjacentes constituem um importante contributo para a obtenção de modelos de crescimento e produção mais dinâmicos e flexíveis. Assim, a predição do volume das árvores é importante não só para a gestão dos povoamentos, quantificação e comercialização dos produtos lenhosos, mas também para a investigação florestal, principalmente a que assenta na modelação do crescimento e produção.

As tabelas de volume de árvore individual podem ser concebidas em função dos objectivos desejados ou da precisão pretendida. Duma maneira geral diferenciam-se umas das outras pelo número de “entradas” que comportam, quer dizer, pelas variáveis da árvore em função das quais fornecem o volume (Rondeux, 1993). Autores como Pardé e Bouchon (1988), Rondeux (1993), Avery e Burkhart (1994) empregam a designação de tabelas de simples entrada, dupla entrada e entradas múltiplas, uma vez que a designação de tabelas locais, referida, por exemplo, por Avery (1967) e Husch *et al.* (1982), é algo confusa na medida em que pode subentender que as tabelas de volume local têm uma aplicação restrita ao espaço de colheita de dados e que são inferiores às tabelas de volume de dupla entrada. Este último pressuposto não é necessariamente verdadeiro, particularmente quando a tabela de volume local é derivada de uma tabela de dupla entrada (Avery, 1967; Avery e Burkhart, 1994). Por outro lado, se não for exigida uma grande precisão para a estimativa, será sempre possível - e mais simples - utilizar as tabelas de simples entrada, mesmo num quadro regional bastante vasto (Pardé e Bouchon, 1988).

Duma maneira geral os métodos de estimação indirecta do volume incluem:

- *Equações de volume total (EVT)*

Dentro das equações de volume total podemos considerar as equações de volume em função do diâmetro ( $d$ ), do diâmetro ( $d$ ) e da altura ( $h$ ) ou do diâmetro ( $d$ ), da altura ( $h$ ) e de um parâmetro de forma.

Assim, as equações que predizem o volume, com e sem casca, em função de uma única variável independente ( $d$ ), de tal forma que  $v=f(d)$ , têm um domínio de

aplicação tanto mais limitado quanto mais restrito e localizado for o número de árvores amostra utilizadas no seu ajustamento (Rondeux, 1993). São uma ferramenta muito útil para os inventários florestais devido à sua simplicidade e rapidez de aplicação, uma vez que não necessitam das variáveis altura e forma mais difíceis de obter. A obtenção deste tipo de equações, baseada somente no diâmetro à altura do peito, presume, na realidade, que a relação altura-diâmetro existe, ou seja, que as árvores pertencentes a uma determinada classe de diâmetro têm uma altura e forma similares. O número de árvores amostra necessário para o ajustamento de uma equação com vista à construção de uma tabela de simples entrada depende das características da espécie, da variabilidade da qualidade da estação e da área geográfica para a sua aplicação (Avery, 1967; Avery e Burkhart, 1994). Segundo os autores, são geralmente necessárias no mínimo 30 a 100 árvores, para pequenas áreas dependendo do número de classes a incluir na tabela.

Resumindo, são tabelas excelentes, de utilização rápida e simples, convindo, de acordo com Pardé e Bouchon (1988), simplesmente, salvo em casos particulares, à cubagem aproximada de povoamentos (não árvores). Quando se pretende uma maior precisão deve-se recorrer às tabelas ou equações de dupla entrada.

Neste tipo de equações o volume é obtido com base em duas variáveis independentes: o diâmetro à altura do peito ( $d$ ) e a altura total ( $h$ ), de tal forma que  $v=f(d, h)$ . A inclusão da variável altura conduz a um ganho de precisão (Rondeux, 1993). As tabelas de dupla entrada obtidas com estas equações têm um uso mais geral, relativamente às de simples entrada, provavelmente à escala regional. No entanto, a sua fiabilidade depende mais da forma das árvores do que da espécie e do local de crescimento (Husch *et al.*, 1982; Rondeux, 1993). Apesar da sua maior precisão, relativamente às de simples entrada, Pardé e Bouchon (1988) consideram ilusório querer cubar uma única árvore com precisão, uma vez que não é possível eliminar a inevitável variabilidade biológica numa tabela.

Este tipo de equações é usado rotineiramente uma vez que explicam geralmente mais de 95 % da variação do volume do tronco (Rustagi e Loveless, 1991).

Uma das variantes destas tabelas, são as designadas tabelas parametrizadas em função de uma variável exterior à árvore (Rondeux, 1993). São construídas com base em uma ou em duas medições por árvore e numa medição ou observação geral relativa ao povoamento, como a altura dominante ou a sua idade [ $v=f(d, h_{dom})$ ].

As equações que predizem o volume em função do diâmetro ( $d$ ), altura ( $h$ ) e uma medida de forma, por exemplo um diâmetro a uma determinada altura “ $i$ ” [ $v=f(d,$

$d_i, h]$ , são consideradas mais precisas que as anteriores e com uma aplicabilidade mais alargada.

Segundo Husch *et al.* (1982), a forma varia entre árvores de diferentes dimensões devido à alteração das taxas de diminuição em diâmetro, conhecida como adelgaçamento, que constitui a principal razão da variação em volume, varia igualmente com a espécie, diâmetro à altura do peito, idade e estação, sendo improvável que as variações nas classes de forma sejam aleatórias. Avery e Burkhart (1994) consideram a forma da árvore difícil de descrever e com um elevado grau de variabilidade quer para a mesma espécie quer para espécies diferentes.

As medidas mais comuns para a forma do tronco são as razões de diâmetros a alturas específicas com o diâmetro à altura do peito. Estas razões são conhecidas como quocientes de forma (Spurr, 1952). Contudo, Behre (1935) e Smith *et al.*, (1961) concluem não existirem vantagens práticas no uso da forma como variável adicional nas equações de volume onde já se encontra o diâmetro  $d$  e a altura  $h$ .

#### - Equações de volume mercantil (EVM)

As equações de volume mercantil podem estimar o volume em função das mesmas variáveis utilizadas nos diversos tipos de equações de volume total. Estas equações permitem estimar volumes mercantis, com e sem casca, com limites fixados aquando da sua construção tendo, por isso, um carácter bastante estático. Sempre que os limites de utilização do tronco forem alterados é obrigatório proceder à construção de novas equações (Tomé *et al.*, 2001). Segundo estes autores, a sua aplicação a árvores com dimensão inferior às fixadas comercialmente pode conduzir a estimativas de volume negativas. Frequentemente, obtêm-se estimativas inconsistentes para diferentes volumes mercantis de uma mesma árvore.

#### - Equações de volume percentual (EVP)

Este tipo de equações permite estimar o volume de madeira, sob e sobre casca, com e sem cepo, para determinadas dimensões mercantis fixadas por diâmetros ou alturas de despona, quando conjugadas com uma equação de volume total. Estimam a percentagem do volume total ( $R$ ) dada pela razão entre o volume acumulado até um determinado diâmetro mercantil  $d_i$  ou altura de despona  $h_i$ , incluindo ou não o cepo, e o volume total. A utilização de equações de volume percentual permite obter estimativas bastante precisas da quantidade de madeira existente desde o nível do cepo até um determinado diâmetro ou altura (Tomé *et al.*, 2001). Com a utilização do tronco para

diferentes categorias de aproveitamentos de madeira e a possível alteração dos limites padrões de utilização com a evolução dos mercados, as equações percentuais tornam-se importantes na medida em que deixam em aberto a possibilidade de opção para obtenção do volume, quer em função de vários diâmetros de despona, quer entre dois diâmetros de despona. Segundo Avery e Burkhart (1994) estas estimativas do volume devem relacionar-se de uma maneira lógica, de tal forma que, por exemplo, o volume estimado para um diâmetro de despona de  $10\text{ cm}$  seja inferior ao volume obtido para um diâmetro de despona de  $7\text{ cm}$  e que a soma dos volumes parciais seja igual à do todo. De acordo com estes autores as equações percentuais, ou mais propriamente de razão de volumes, trazem flexibilidade às tabelas de volume mantendo todavia relações lógicas.

A utilização de uma equação de volume percentual para a estimação de volumes por categorias de aproveitamento pressupõe a existência de uma equação de volume para o cálculo dos volumes totais (Tomé, 1990).

Estas equações são condicionadas de tal modo que quando  $d_i=0$  e  $h_i=h$ , a razão  $R=v_m/v$  é igual a  $1$ , e portanto o volume mercantil  $v_m$  é igual ao volume total  $v$ , sendo  $d_i$  e  $h_i$  o diâmetro e a altura de despona, respectivamente. Nestas condições as equações de volume percentual são compatíveis com as equações de volume total.

Uma vez que estas equações não permitem estimar directamente as dimensões das árvores, como por exemplo, a altura da árvore para um determinado diâmetro ou o diâmetro para uma dada altura, utilizadas como referência no mercado para alguns produtos (postes, por exemplo), torna-se necessário conhecer o perfil do tronco.

#### *- Equações de perfil do tronco (EPT)*

As equações de perfil do tronco permitem estimar o diâmetro  $d_i$  do tronco, com e sem casca, para qualquer nível de altura  $h_i$  da árvore, em função do diâmetro à altura do peito  $d$ , da altura total da árvore  $h$  e da altura para a qual se pretende estimar o diâmetro  $h_i$ . As equações ou curvas de perfil do tronco permitem calcular o volume para qualquer limite ou segmento mercantil. Assim, para se obterem volumes para uma determinada porção do tronco é necessário dividi-lo em pequenas fracções e estimar os respectivos diâmetros os quais serão posteriormente utilizados para a determinação do volume entre secções, sendo o volume total dado pela soma dos volumes parciais dos diferentes segmentos do tronco considerados. Estimativas mais precisas do volume podem ser obtidas através da integração da equação do perfil do tronco (Avery e Burkhart, 1994).

No entanto, segundo estes autores, as estimativas do volume a partir de equações de perfil do tronco são enviesadas uma vez que no processo de ajustamento da regressão é minimizada a soma do quadrado dos desvios relativa aos diâmetros em vez da soma de quadrados dos desvios referente ao volume. Para solucionar este problema têm sido desenvolvidas técnicas que permitem estimar equações de perfil do tronco compatíveis, *i. e.*, equações que quando integradas produzem uma estimativa do volume total idêntica à obtida por uma equação de volume total. As equações de volume e de perfil do tronco são analiticamente compatíveis quando uma pode ser expressa em função da outra.

A estratégia para a modelação do perfil do tronco consiste em formular e ajustar uma função matemática cujo gráfico se assemelhe ao perfil do tronco, embora isto seja mais simples de dizer do que de fazer. Assim, muitas e diferentes aproximações têm sido usadas para estimar o diâmetro superior do tronco e ou calcular o volume mercantil de uma árvore através do desenvolvimento de vários tipos de equações de perfil do tronco (adelgaçamento) (Sharma e Oderwald, 2001), algumas delas incluindo formulações que contabilizam os três reconhecidos segmentos de uma árvore, neiloide para a base, parabolóide para a secção média e o cone para o topo (Assmann, 1970; Avery e Burkhart, 1994; Valentine e Gregoire, 2001; Sharma e Burkhart, 2003).

Alguns exemplos incluem polinómios (Goulding e Murray, 1976; Allen, 1992), polinómios segmentados (Max e Burkhart, 1976; Cao *et al.*, 1980; Parresol *et al.*, 1987), modelos trigonométricos (Thomas e Parresol, 1991), razões de volume (Demaerschalk, 1973; Reed e Green, 1984; Amateis e Burkhart, 1987; Tasissa *et al.*, 1997), forma variável (Kozak, 1988; Perez *et al.*, 1990; Newnham, 1992) onde o valor do expoente determina a aproximação ao neiloide, parabolóide ou cone, e equações de perfil do tronco e volume compatíveis (Bailey, 1994; Tarp-Johansen *et al.*, 1997; Fang e Bailey, 1999; Fang *et al.*, 2000). Flewelling e Raynes (1993) obtêm um modelo de forma variável baseado num sistema de três equações condicionadas que permite considerar uma grande variedade de formas para árvores de diferentes dimensões. Fang *et al.* (2000) derivaram um modelo de expoente variável com as três secções da árvore. Valentine e Gregoire (2001) apresentam um modelo que pode ser considerado tanto de forma variável como de expoente variável, que referem fornecer estimativas bastante razoáveis com parâmetros fáceis de interpretar. Sharma e Oderwald (2001) chamam a atenção para a dificuldade na estimação dos parâmetros para alguns destes modelos dando como exemplo a equação apresentada por Kozak (1988) e Bailey (1994), difíceis

de implementar por requererem a altura do ponto de inflexão, o qual varia de árvore para árvore.

Muitos destes modelos possuem restrições impostas aos parâmetros ou foram formulados para assegurar consistência analítica com o volume total. Por exemplo, Goulding e Murray (1976) impõem a condição aos parâmetros de tal forma que integrando a equação polinomial do perfil do tronco desde o zero até à altura total se obtenha o volume total da árvore. Reed e Green (1984) impõem a condição de assegurar que o volume obtido para uma porção do tronco por integração da curva de perfil seja igual ao volume da mesma fração de tronco obtido através da equação percentual compatível.

Quando se pretende a repartição do volume total por categorias de aproveitamento devem existir modelos que permitam a estimação de volumes entre determinadas secções do tronco com alturas mercantis previamente fixadas, sendo as equações de perfil do tronco uma das ferramentas para este propósito (Tomé *et al.*, 2001). Em princípio, as funções de adelgaçamento ou perfil do tronco podem substituir as equações de volume e as equações de razão de volumes (Fonweban e Houllier, 1997), embora com algum enviesamento. Estas funções são importantes para a gestão florestal bem como para o desenvolvimento de modelos de crescimento e produção.

## 4.2. METODOLOGIA

### 4.2.1. Dados

Os dados disponíveis para o desenvolvimento das equações de volume e forma a aplicar aos povoamentos de castanheiro em alto fuste, são provenientes dos povoamentos adultos em estudo localizados nas serras de Bornes, Marão e Padrela. Assim, foram considerados três tipos de dados: dados proveniente da cubagem de 269 árvores em pé com telerelascópio no povoamento *C* da Padrela (local de Vale do Carro) obtidos no ano de 2002 e informação recolhida anteriormente nas parcelas permanentes localizadas nos povoamentos de Bornes (uma parcela de 500 m<sup>2</sup>, medida em 1990), e Marão (duas parcelas de 500 m<sup>2</sup> cada, medidas em 1992) bem como os dados de uma parcela permanente localizada no povoamento *A* da Padrela (parcela de 1000 m<sup>2</sup>, medida em 1990). Para além dos dados obtidos por cubagem rigorosa com telerelascópio, foram considerados os dados das 34 árvores abatidas para biomassa<sup>1</sup> e

---

<sup>1</sup> A distribuição do número de árvores por local será apresentada no ponto relativo à biomassa.

análise do tronco mais 5 árvores (4 delas abatidas anteriormente nas parcelas permanentes já referidas: 1 em Bornes, 2 no Marão, 1 na Padrela) mais uma árvore abatida, na actualidade, na proximidade da parcela permanente do povoamento B de 1,9 ha, na Padrela. No total utilizaram-se 39 árvores abatidas para cubagem rigorosa. A cubagem foi efectuada com base nas medições dos diâmetros efectuadas na base, à altura do peito (1,30 m) e a partir deste nível de 2,25 em 2,25 m, tanto para as árvores abatidas como para as árvores em pé, até à despona de 7 cm, à excepção dos dados recolhidos anteriormente onde se efectuaram as medições de 2 em 2 m de comprimento a partir do diâmetro à altura do peito. Além destes dados foram medidas 125 árvores não bifurcadas no povoamento da Padrela (Povoamento C) submetido a corte final raso com sementões em 2002-2003. Para tal, acompanhou-se o corte final e procedeu-se à medição da parte comercial das árvores, não sendo possível obter o comprimento total da árvore nem a altura do cepo. Uma vez que todas as árvores tinham a marcação do diâmetro a 1,30 m de altura, foram medidos os diâmetro, com e sem casca, na base, no  $d$ , e a partir deste nível nas zonas de toragem preconizadas pelo madeireiro, com comprimentos que variaram entre os 2 e 4 metros, dependendo da qualidade do tronco, com vista à maximização do seu aproveitamento em madeira. Considerou-se que a altura do cepo da parte superior da encosta era praticamente zero uma vez que antes do abate se procedia à limpeza e escavação da base do tronco de forma a aproveitar o mais possível o toro da base, em princípio o mais valioso. Ao nível do  $d$  o diâmetro sob casca foi medido com um medidor de espessura de casca uma vez que, por razões óbvias, não se efectuava a toragem a este nível.

Os volumes foram calculados, para cada uma das secções intermédias que constituem a parte comercial da árvore, como um parabolóide ordinário, pela fórmula de Smalian, enquanto o cepo foi cubado como um cilindro e a bicada como um cone.

A informação recolhida foi organizada, após verificação, em três ficheiros de dados:

- 1 - Cubagem rigorosa das árvores em pé com telerelascópio (n = 466 árvores);
- 2 - Cubagem rigorosa das árvores abatidas para análise do tronco (n = 39 árvores);
- 3 - Cubagem rigorosa da fracção comercial das árvores abatidas em corte final (n = 125 árvores).

O primeiro ficheiro foi utilizado para o cálculo do volume total e o segundo para validação dos modelos.

Para cada tipo de dados foram organizados mais três ficheiros (1', 2' e 3', respectivamente), com os volumes parciais acumulados para um determinado diâmetro e altura da árvore. Na verificação dos dados foram eliminadas todas as observações que apresentavam um diâmetro  $d_i$  superior ao  $d$ , bem como as observações com  $d_i=0$ . O primeiro ficheiro assim obtido (1' com  $n = 3\ 690$  observações) serviu de base ao ajustamento das equações de volume percentual com casca e o segundo (2' com  $n = 330$  observações) para validação dos modelos obtidos com e sem casca, enquanto o terceiro (3' com  $n = 664$  observações) serviu para o ajustamento e validação dos modelos percentuais de volume utilizável sem casca e do volume comercial também sem casca.

#### 4.2.2. Caracterização dos conjuntos de dados

No Quadro 4.1 é caracterizado o conjunto de dados resultante da cubagem rigorosa das árvores em pé com telerelascópio, por parcela, para os diferentes locais e para a totalidade dos dados. Estes dados serão utilizados no ajustamento das equações de volume total e percentual com casca e equações de perfil do tronco também com casca.

Quadro 4.1: Caracterização dendrométrica do conjunto de dados 1 a utilizar no ajustamento das equações de volume total, percentual e perfil do tronco (volumes obtidos por cubagem rigorosa com telerelascópio).

Parcela	Variável	Nº árv.	Média	s	Mín.	Máx.
Bornes	d_cc	76	20,80	5,81	10,30	34,00
	h		19,05	2,67	11,94	24,01
	v_cc		0,33	0,22	0,04	1,09
Marão - A	d_cc	26	28,35	5,45	19,70	41,50
	h		14,14	2,48	11,06	21,39
	v_cc		0,38	0,15	0,16	0,70
Marão - B	d_cc	29	37,28	8,98	22,50	54,10
	h		27,77	2,84	22,91	33,90
	v_cc		1,20	0,66	0,33	2,50
Padrela - A	d_cc	66	32,35	10,07	9,00	56,00
	h		23,27	2,81	12,15	26,86
	v_cc		0,93	0,56	0,04	2,33
Padrela - C	d_cc	269	37,30	12,16	9,00	69,30
	h		20,34	4,76	6,11	30,92
	v_cc		1,11	0,74	0,02	4,02
Total (conj. 1)	d_cc	466	33,41	12,19	9,00	69,30
	h		20,66	4,81	6,11	33,90
	v_cc		0,92	0,70	0,02	4,02

d\_cc, diâmetro a 1,30 m de altura com casca (cm); h, altura total da árvore (m); v\_cc, volume total com casca (m<sup>3</sup>); s, desvio padrão.

No Quadro 4.2 são caracterizados os conjuntos de dados 2 e 3 obtidos por cubagem rigorosa das árvores abatidas para análise de tronco e abatidas em corte final. Neste último caso recolheram-se dados apenas da porção mercantil do tronco.

O conjunto de dados obtido nas árvores abatidas para análise do tronco será utilizado para validação dos modelos de volume total, percentual e perfil do tronco, enquanto que a informação recolhida durante o corte final servirá para o ajustamento de equações de volume percentual sem casca e também validação do volume percentual com casca.

Quadro 4.2: Caracterização dendrométrica dos conjuntos de dados 2 e 3 provenientes das árvores abatidas para análise do tronco e do corte final efectuado no povoamento C da Padrela.

Conj. dados	Variável	Nº árv.	Média	s	Mín.	Máx.
Análise tronco (conj. 2)	d_cc	39	34,81	13,61	10,25	64,20
	d_sc		33,07	13,19	9,50	61,25
	h		22,28	4,51	11,55	30,40
	v_cc		1,20	0,91	0,05	3,38
	v_sc		1,07	0,82	0,04	3,06
Corte final (conj. 3)	d_cc	125	41,40	8,58	22,40	62,30
	d_sc		38,99	8,35	21,20	58,60
	hm		13,32	4,09	3,20	20,81
	v <sub>m_cc</sub>		1,21	0,52	0,34	2,50
	v <sub>m_sc</sub>		1,08	0,47	0,30	2,23

v<sub>m\_cc</sub>, volume mercantil com casca (m<sup>3</sup>); v<sub>m\_sc</sub>, volume mercantil sem casca (m<sup>3</sup>). As restantes designações têm o significado definido anteriormente.

O conjunto de dados proveniente da cubagem rigorosa das árvores abatidas para análise do tronco é bastante limitado, apenas 39 árvores, sendo a maioria dominantes ou co-dominantes. Este ficheiro será usado para validar os modelos ajustados com os outros dois conjuntos de dados.

#### 4.2.3. Modelos candidatos

No Quadro 4.3 são apresentados os modelos pré-candidatos para a estimação do volume total. Os modelos de volume total, volume percentual e perfil do tronco apresentados nos Quadros 4.4 e 4.5 foram seleccionados de acordo com a bibliografia consultada, nomeadamente Cao *et al.* (1980); Clutter (1980); Clutter *et al.* (1983); Amidon (1984); Biging (1984); Martin (1984); Byrne e Reed (1986); Parresol *et al.* (1987); Thomas e Parresol (1991); Alegria (1994). Atendendo ao trabalho de Nunes (2001) para a determinação do volume total para o castanheiro em alto fuste, optou-se por não considerar os modelos lineares com várias combinações das variáveis

explanatórias uma vez que demonstraram elevada colinearidade, como normalmente acontece não só para o castanheiro como para qualquer outra espécie.

Quadro 4.3: Modelos pré-candidatos para o desenvolvimento de equações de volume total de dupla entrada

Ref.	Modelo	Designação	Observações
EVT1	$v = \beta_1 d^{\beta_2} h^{\beta_3}$	Schumacher e Hall (1933)	Mod. não lineares
EVT2	$v = \beta_1 (d^2 h)^{\beta_2}$	Spurr (1952)	
EVT3	$v = d^2 / (\beta_0 + \beta_1 h^{-1})$	Honer (1965)	
EVT4	$v = d^2 h / (\beta_0 + \beta_1 d)$	Takata (s. d.)	
EVT5	$v = \beta_0 + \beta_1 d^{\beta_2} h^{\beta_3}$	Burkhart (1977)	
EVT6	$v = \beta_0 + \beta_1 d^2 h$	Spurr (1952)	Mod. lineares
EVT7	$v = \beta_1 d^2 h$	Spurr (1952)	
EVT8	$v = d^2 (\beta_1 + \beta_2 h)$	Ogaya (1968)	

Para o ajustamento dos modelos de volume percentual em função de um diâmetro de despona  $d_i$ , ou altura de despona  $h_i$ , foram testadas as equações apresentadas no Quadro 4.4.

Quadro 4.4: Modelos testados para o desenvolvimento de equações de volume percentual em função de um diâmetro de despona ou altura de despona.

Ref.	Modelo	Designação	Obs.
Equações de volume percentual em função da altura de despona			
EVPH1	$R = 1 + [\beta_1 (h - h_i)^{\beta_2} / h^{\beta_3}]$	Cao <i>et al.</i> (1980)	Não lineares
EVPH2	$R = 1 - z + \beta_2 (z^2 - z) + \beta_3 (z^3 - z) + \beta_4 (z^4 - z) + \beta_5 (z^5 - z) + \beta_6 (z^6 - z)$	Cao <i>et al.</i> (1980)	
EVPH3	$R = 1 - [1 - \exp(-\beta_1 \tan(\beta_2 h^{\beta_3} z))]^{\beta_4}$	Matney e Sullivan (1980)	
EVPH4	$R = 1 - z^{\beta_1}$	Reed e Green (1984)	
EVPH5	$R = \exp(\beta_1 z^{\beta_2})$	Parresol <i>et al.</i> (1987)	
EVPH6	$R = \exp[\beta_1 (p^{\beta_2} / h^{\beta_3})]$	Parresol <i>et al.</i> (1987)	
EVPH7	$R = 1 + \beta_1 (h_i / h - 1) + \beta_2 (h_i^2 / h^2 - 1)$	Honer (1967)	Linear
Equações de volume percentual em função do diâmetro de despona			
EVPD1	$R = 1 + \beta_1 (d_i^{\beta_2} / d^{\beta_3})$	Burkhart (1977)	Não lineares
EVPD2	$R = 1 - \beta_1 (d_i^{\beta_2} d^{\beta_3})$	Clutter (1980)	
EVPD3	$R = 1 - [1 - \exp(-\beta_1 \tan(\beta_2 h^{\beta_3} (d_i / d)))]^{\beta_4}$	Matney e Sullivan (1980)	
EVPD4	$R = \exp[\beta_1 (d_i / d)^{\beta_2}]$	Deusen <i>et al.</i> (1981)	
EVPD5	$R = 1 + \beta_1 d_i^{\beta_2} / (d^{\beta_3} h^{\beta_4})$	Reed e Green (1984)	
EVPD6	$R = 1 + \beta_1 (d_i / d)^{\beta_2} (\beta_3 h + \beta_4)^{\beta_5}$	Reed e Green (1984)	
EVPD7	$R = \exp[\beta_1 (d_i^{\beta_2} / d^{\beta_3})]$	Parresol <i>et al.</i> (1987)	
EVPD8	$R = 1 + \beta_1 (d_i / d) + \beta_2 (d_i / d)^2 + \beta_3 (d_i / d)^3 + \beta_4 (d_i / d)^4 + \beta_5 (d_i / d)^5 + \beta_6 (d_i / d)^6$	Cao <i>et al.</i> (1980)	Linear

Para a predição do perfil do tronco do castanheiro, em regime de alto fuste, testaram-se vários tipos de funções com vista à obtenção do modelo que melhor transcrevesse a sua forma. No Quadro 4.5 são apresentadas as equações de perfil do tronco testadas.

Quadro 4.5: Equações testadas para a modelação do perfil do tronco.

Ref.	Modelo	Designação
EPT1	$di=d[\beta_1(hi/h-1)+\beta_2(hi^2/h^2-1)]^{0,5}$	Kozac <i>et al.</i> (1969)
EPT2	$di=d[\beta_1(1-2hi/h+hi^2/h^2-1)]^{0,5}$	Kozac <i>et al.</i> (1969)
EPT3	$di=d(\beta_1z^{\beta_2})^{0,5}$	Demaerschalk (1972)
EPT4	$di=\beta_1d^{\beta_2}(h-hi)^{\beta_3}h^{\beta_4}$	Demaerschalk (1972)
EPT5	$di=d[\beta_1(1/(d^2h))(h-hi)/h)^{\beta_2}+\beta_3((h-hi)/h)^{\beta_4}]^{0,5}$	Demaerschalk (1973)
EPT6	$di=d[\beta_1(h-hi)^{\beta_2}/(\beta_3h^{\beta_2+1}+\beta_4h^{\beta_2})]^{0,5}$	Demaerschalk (1973)
EPT7	$di=d[(h-hi)/(h-1,3)]^{\beta_1}$	Ormerod (1973)
EPT8	$di=[(v/(kh))(2z+\beta_1(3z^2-2z)+\beta_2(4z^3-2z)+\beta_3(5z^4-2z)+\beta_4(6z^5-2z))]^{0,5}$	Goulding e Murray (1976)
EPT9	$di=d[\beta_1+\beta_2\ln(1-(hi/h)^{\beta_3}(1-\exp(-\beta_1/\beta_2)))]$	Biging (1984)
EPT10	$di=d[\beta_1(hi/h-1)+\beta_2(hi^2/h^2-1)+\beta_3(u_1-hi/h)^2I_1+\beta_4(u_2-hi/h)^2I_2]^{0,5}$ com $I_i=1, hi/h \leq u_i$ e $I_i=0, hi/h > u_i$ ; $i=1, 2$	Max e Burkhardt (1976)
EPT11	$di=d[\beta_1(hi/h-1)+\beta_2(hi^2/h^2-1)+\beta_3(u_1-hi/h)^2I_1]^{0,5}$ com $I_i=1, hi/h \leq u_i$ e $I_i=0, hi/h > u_i$	Max e Burkhardt (1976)
EPT12	$di=[(v/kh)(2z+\beta_1(3z^2-2z)+\beta_2(z-u_1)^2I_1+\beta_3(z-u_2)^2I_2)]^{0,5}$ com $I_i=1, z \geq u_i$ e $I_i=0, z < u_i$ ; $i=1, 2$	Cao <i>et al.</i> (1980)
EPT13	$di=d[\beta_1z^2+\beta_2z^3+\beta_3(z-u)^2I+\beta_4(z+2u)(z-u)^2I]^{0,5}$ com $I=1, z \geq u$ e $I=0, z < u$	Parresol <i>et al</i> (1987)
EPT14	$di=d[\beta_1(hi/h-1)+\beta_2\text{sen}(c \Pi hi/h)+\beta_3\text{cot}(\Pi/2(hi/h))]^{0,5}$	Thomas e Parresol (1991)
EPT15	$di=d[\beta_1x^{1,5}(10^{-1})+\beta_2(x^{1,5}-x^3)d(10^{-2})+\beta_3(x^{1,5}-x^3)h(10^{-3})+\beta_4(x^{1,5}-x^{32})hd(10^{-5})+\beta_5(x^{1,5}-x^{32})h^{1/2}(10^{-3})+\beta_6(x^{1,5}-x^{40})h^2(10^{-6})]$	Bruce <i>et al.</i> (1968)
EPT16	$di=\beta_1d(h-hi)/(h-1,3)+\beta_2(h-hi)(hi-1,3)+\beta_3h(h-hi)(hi-1,3)+\beta_4(h-hi)(hi-1,3)(h+hi+1,3)$	Bennett <i>et al.</i> (1972)
EPT17	$di=\beta_1d(h-hi)/(h-1,3)+\beta_2(h^2-hi^2)(hi-1,3)/h^2$	Amidon (1984)

No modelo EPT8 e EPT12 a variável v, correspondente ao volume total, é estimada pelo modelo  $v = \beta_1(d^2 h)^{\beta_2}$ , seleccionado para as equações de volume total.

A simbologia utilizada tem o seguinte significado:

di - diâmetro do tronco (cm) à altura hi;

d - diâmetro à altura do peito (cm);

hi - altura da árvore (m) até ao diâmetro di;

h - altura total da árvore (m);

$k - \Pi/[4(100)^2]$ , constante que quando multiplicada por  $d^2$  iguala a área seccional da árvore ( $m^2$ );

$v$  - volume total da árvore ( $m^3$ );

$v_m$  - volume mercantil ( $m^3$ ) até um determinado diâmetro ou altura de despona;

$p = h-h_i$ ;

$z = (h-h_i)/h$ , altura relativa da árvore;

$x = (h-h_i)/(h-1,3)$ ;

$R = v_m/v$ , percentagem do volume total da árvore para um determinado diâmetro de despona  $d_i$  ou altura de despona  $h_i$ .

Esta notação será adoptada ao longo deste trabalho acrescentando a simbologia *cc* (com casca) ou *sc* (sem casca), sempre que se torne necessário.

#### **4.2.4. Critérios utilizados no ajustamento e selecção dos modelos de cada tipo**

O ajustamento das equações apresentadas no ponto anterior nos Quadros 4.3, 4.4 e 4.5, foi efectuado com base no método dos mínimos quadrados lineares e não lineares ordinários (OLS), dependendo do tipo de modelo. Para tal, recorreu-se ao procedimento *PROC REG* e *PROC NLIN* com o método iterativo de minimização de Gauss-Newton, do programa *SAS/STAT*. O ajustamento e consequente verificação dos pressupostos da regressão pôs em evidência a não normalidade dos resíduos e a heterocedasticidade dos mesmos, sobretudo para as equações de volume total cujos resíduos studentizados demonstraram um padrão comum de variação crescente com o aumentando da variável dependente, pelo que se seguiu um procedimento análogo ao já utilizado anteriormente para casos semelhantes. Assim, recorreu-se à regressão dos mínimos quadrados lineares ou não lineares, ponderada iterativamente (*IRWLS*) com recurso à função de Huber com um valor limite de  $r=1$  e um factor de ponderação ( $1/d^2h$ ) para as equações de volume total,  $r=1$  para as equações de volume percentual e  $r=2$  para as equações do perfil do tronco. Diversos autores como Gregoire e Dyer (1989); Williams e Gregoire (1993) usam funções ponderadas para homogeneizar a variância da distribuição do erro na estimação do volume total. Segundo Williams e Schreuder (1996) os modelos de volume total assumem o erro  $\varepsilon_i=f(d_i)$  ou  $\varepsilon_i=f(d_i, h_i)$  com distribuição normal.

Para avaliar o desempenho dos modelos foram considerados vários critérios de discriminação quer relativamente à qualidade do ajustamento quer à sua capacidade preditiva. Relativamente à qualidade do ajustamento foi avaliada: a significância e

estabilidade dos parâmetros, o quadrado médio do erro ponderado do modelo (*QMR*), o  $R^2$  ajustado ou a eficiência de modelação *EM*, dependendo se o modelo é linear ou não linear, os gráficos de resíduos studentizados em função da variável dependente estimada e de detecção de normalidade com base nos gráficos de resíduos em papel de probabilidades normal. No que se refere à capacidade preditiva dos modelos foi considerado o  $R^2$  de predição ( $R^2_{pred}$ ), a média dos resíduos *PRESS* (*mPRESS*), a média do valor absoluto dos resíduos *PRESS* (*maPRESS*), os valores dos percentis 95% (*P95*) e 5% (*P5*), relativamente ao conjunto de ajustamento bem como a análise da colinearidade através da observação da matriz de correlação entre os parâmetros, factor de inflação da variância (*VIF*) para os modelos lineares e o número de condição da matriz (*NCOND*), para os modelos não lineares. O factor de inflação da variância (*VIF*) representa a inflação da variância dos coeficientes de regressão estimados, relativamente à variância resultante quando as variáveis independentes não se encontram relacionadas linearmente, ou seja, quando a matriz de correlação for uma matriz identidade. Um valor de *VIF* superior a 10 é um indicador de que a colinearidade pode constituir um problema (Myers, 1986). Este factor é obtido através da diagonal da inversa da matriz de correlação, podendo definir-se, para um determinado coeficiente *i* como:

$VIF_i = 1/(1-R_i^2)$  , onde  $R_i^2$  representa o coeficiente de determinação múltiplo produzido quando se regride a variável  $x_i$  sobre as outras variáveis regressoras  $x_j$  ( $j \neq i$ ).

O número de condição da matriz  $X^*X^*$  para os modelos lineares e  $W'W$  para os não lineares, e restantes estatísticas, têm o significado descrito anteriormente. Para além da análise do ajustamento e predição dos modelos ao mesmo conjunto de dados foi utilizado um agrupamento independente de dados para validação cujos valores foram obtidos em árvores abatidas submetidas a cubagem rigorosa na sua totalidade. Assim, as equações de volume total foram ajustadas com o conjunto de dados 1 e validadas com o conjunto de dados 2. As equações percentuais com casca, quer para um diâmetro de despona, quer para uma altura de despona, foram ajustadas com o conjunto de dados 1' e validadas com o conjunto de dados 2'. Por outro lado as equações de volume comercial percentual sem casca foram ajustadas com o conjunto de dados 3' e validadas com o mesmo conjunto de dados com recurso aos resíduos *PRESS* e *aPRESS*. Uma vez que a aplicação dos modelos percentuais de volume comercial sem casca para diâmetros e alturas de despona variáveis dependem do conhecimento do volume comercial, foram ajustadas também equações com esse objectivo.

Relativamente às funções de perfil do tronco estas foram ajustadas com o conjunto de dados 1' e validadas com o ficheiro de dados 2'.

Os critérios estatísticos utilizados na validação com um conjunto de dados independente com vista à selecção do melhor modelo baseiam-se nos resíduos de predição ( $rp$ ) obtidos através das diferenças entre os valores observados e valores estimados por cada modelo, para o novo conjunto de dados. Como medidas de enviesamento e precisão considerou-se a média ( $mrp$ ) e a média dos valores absolutos ( $marp$ ) dos resíduos de predição, variância dos resíduos de predição ( $Vrp$ ) e eficiência de modelação dos resíduos de predição obtidas da seguinte forma:

$$mrp = \frac{\sum_{i=1}^n rp_i}{n}; \quad marp = \frac{\sum_{i=1}^n |rp_i|}{n}; \quad Vrp = \frac{\sum_{i=1}^n (rp_i - r\bar{p})^2}{n-1}; \quad R^2 rp = 1 - \frac{SQrp}{SQT}; \quad \text{onde}$$

$rp_i = (y_i - \hat{y}_i)$ ,  $n$  é o número de observações utilizadas para validação do modelo,  $SQrp$  é a soma de quadrados dos resíduos de predição e  $SQT$  a soma de quadrados total para o mesmo conjunto de dados.

Por outro lado, analisou-se a distribuição dos erros de predição por classes de  $h$ ,  $d$ ,  $di$  e  $hi$ , dependendo do modelo em causa, e observaram-se os gráficos dos valores observados sobre os valores estimados.

Para a selecção dos modelos atribuiu-se um índice a cada estatística usada fazendo corresponder o valor 1 ao “melhor” valor, o 2 ao segundo melhor dessa estatística e assim sucessivamente. O índice final de cada modelo corresponde ao somatório dos índices parciais de cada estatística, todos eles com o mesmo peso. Este procedimento foi aplicado quer na fase de ajustamento quer na fase de validação para ordenação dos modelos, correspondendo ao menor somatório a melhor equação.

### 4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.3.1. Equações de volume total

Os modelos apresentados na secção 4.2.3., Quadro 4.3 foram ajustados ao conjunto de dados 1 e validados com o conjunto de dados 2, de acordo com a metodologia descrita.

No Quadro 4.6 apresentam-se os valores das estatísticas de ajustamento e predição, atrás referidas, calculadas para o conjunto de dados de ajustamento das

equações de volume total com casca. Uma vez que o coeficiente  $\beta_0$  do modelo *EVT5* não é significativo, o reajustamento do modelo sem este coeficiente corresponde ao modelo *EVT1*.

Quadro 4.6: Medidas de ajustamento e capacidade preditiva dos modelos de volume total sobre casca, após ponderação pela função de Huber e  $1/d^2h$  (fase de ajustamento).

Modelo	QMR	EM	mPRESS	maPRESS	$R^2_{pred}$	P95	P5	NCOND
Modelos não lineares (n=466)								
EVT1	$0,3137 \cdot 10^{-6}$	0,9805	-0,0059	0,0899	0,9597	0,1775	-0,2238	597,9648
EVT2	$0,3135 \cdot 10^{-6}$	0,9806	-0,0057	0,0897	0,9599	0,1773	-0,2232	904,3870
EVT3	$0,3258 \cdot 10^{-6}$	0,9798	-0,0075	0,0904	0,9579	0,1654	-0,2777	128,6933
EVT4	$0,3132 \cdot 10^{-6}$	0,9807	-0,0055	0,0894	0,9599	0,1719	-0,2293	58,2891
Modelos lineares (n=466)								VIF
EVT6	$0,3246 \cdot 10^{-6}$	0,9799	-0,0070	0,0901	0,9578	0,1614	-0,2507	1,0000
EVT7	$0,3347 \cdot 10^{-6}$	0,9877	-0,0082	0,0905	0,9560	0,1577	-0,2745	1,0000
EVT8	$0,3277 \cdot 10^{-6}$	0,9879	-0,0077	0,0907	0,9573	0,1612	-0,2803	23,4964

A aplicação dos índices descritos para a selecção dos modelos conduziu à seriação que a seguir se apresenta (por ordem decrescente, do melhor para o pior):

*Modelos não lineares - EVT4, EVT2, EVT1 e EVT3.*

*Modelos lineares – EVT6, EVT8 e EVT7.*

A análise dos gráficos de resíduos studentizados *vs.* valores estimados, após ponderação pela função influência de Huber com  $r=1$  e  $1/d^2h$ , não revelou qualquer tendência que evidenciasse qualquer problema. Por sua vez os gráficos dos resíduos studentizados em papel de probabilidades normal não se afastam dos padrões de normalidade. A análise da colinearidade foi um dos factores a ter em conta na selecção do modelo final. O problema base da colinearidade resulta do facto dos dados não conterem suficiente informação para separar os efeitos de diferentes parâmetros, prevalecendo o problema quando é usado qualquer método de estimação (Lappi e Bailey, 1988).

No Quadro 4.7 apresentam-se os valores das estatísticas calculadas para o conjunto de dados de validação (conjunto 2).

Quadro 4.7: Medidas de capacidade preditiva resultantes do processo de validação para as equações de volume total com casca.

Modelo	QMrp	R <sup>2</sup> rp	m <sub>rp</sub>	m <sub>arp</sub>	V <sub>rp</sub>
Modelos não lineares (n=39)					
EVT1	0,0225	0,9718	0,0836	0,1028	0,0159
EVT2	0,0227	0,9717	0,0787	0,1021	0,0169
EVT3	0,0252	0,9685	0,0830	0,1099	0,0188
EVT4	0,0237	0,9704	0,0838	0,1058	0,0172
Modelos lineares (n=39)					
EVT6	0,0223	0,9722	0,0772	0,1036	0,0168
EVT7	0,0210	0,9738	0,0725	0,1012	0,0161
EVT8	0,0240	0,9703	0,0810	0,1077	0,0177

QMrp, quadrado médio dos resíduos de predição.

A atribuição dos índices de selecção às estatísticas calculadas com o ficheiro de validação conduziu à ordenação apresentada no Quadro 4.8.

Quadro 4.8: Ordenação dos modelos de volume total com casca na fase de validação.

Modelo	QMrp	R <sup>2</sup> rp	m <sub>rp</sub>	m <sub>arp</sub>	V <sub>rp</sub>	Total
Modelos não lineares						
EVT1	1	1	3	2	1	<b>8</b>
EVT2	2	2	1	1	2	<b>8</b>
EVT3	4	4	2	4	4	18
EVT4	3	3	4	3	3	16
Modelos lineares						
EVT6	2	1	2	2	2	9
EVT7	1	1	1	1	1	<b>5</b>
EVT8	3	2	3	3	3	14

Analisando os resultados da seriação dos modelos de volume total na fase de ajustamento e validação verificam-se algumas alterações na sua ordenação. Assim enquanto na fase de ajustamento se tinha seriado em primeiro lugar o modelo *EVT4*, logo seguido do *EVT2*, de entre os não lineares, e o *EVT6* e *EVT8*, de entre os lineares, no processo de validação são ordenados em primeiro lugar, em *ex aequo*, os modelos *EVT1* e *EVT2* de entre os não lineares e *EVT7* e *EVT6* de entre os lineares. Analisando os modelos *EVT1* e *EVT2* verifica-se que este último possui menor colinearidade, não havendo uma grande diferença nas restantes estatísticas. O modelo *EVT4* com melhor desempenho na fase de ajustamento e menor colinearidade, de entre os modelos não lineares, piora o seu comportamento na fase de validação, pelo que se achou preferível confiar mais nas estatísticas de predição, em vez das estatísticas de ajustamento, as

quais dão uma indicação da forma como a equação de volume total predirá em futuras aplicações, como sugerem Neter *et al.* (1990).

Relativamente aos modelos lineares a diferença entre as equações seleccionadas na fase de validação (*EVT7* e *EVT6*), resume-se ao parâmetro  $\beta_0$ , uma vez que forçando a equação da variável combinada *EVT6* a passar pela origem, obtém-se a equação de Spurr de factor de forma constante *EVT7*.

Com base no exposto, a nossa pré-selecção, relativamente aos modelos não lineares, recai sobre os modelos *EVT2*, *EVT1* e *EVT4*. No que se refere aos modelos lineares, a pré-selecção incide sobre os modelos *EVT6* e *EVT7*.

Para clarificar melhor o desempenho dos modelos é efectuada a análise do enviesamento e precisão de cada um deles por classes de diâmetro à altura do peito ( $d$ ) e por classes de altura total ( $h$ ) (*vide* Quadro 4.9), para o conjunto de validação.

A análise dos resíduos dos modelos por classes de diâmetro  $d$  e altura  $h$  evidencia uma tendência crescente do erro com o aumento da classe de dimensão, salvo raras excepções.

O modelo *EVT4*, seleccionado em primeiro lugar na fase de ajustamento, apresenta um enviesamento superior e uma precisão inferior aos modelos *EVT2* e *EVT1*, para a maioria das classes, quer de altura, quer de diâmetro. Comparando os modelos *EVT2* e *EVT1*, verifica-se a superioridade do primeiro, relativamente ao segundo, bem como relativamente aos restantes modelos não lineares, para a maioria das classes analisadas.

Relativamente aos modelos lineares verifica-se a superioridade do modelo *EVT6*, quer em termos de enviesamento quer em termos de precisão, relativamente aos seus homólogos. O modelo de Spurr sem ordenada na origem (*EVT7*) apresenta erros superiores para as classes de diâmetro menores ou iguais a  $30\text{ cm}$  e classes de altura inferiores a  $24\text{ m}$ , o que sugere que para povoamentos jovens se deverá optar pelo modelo com ordenada na origem e para os povoamentos mais velhos pelo modelo sem ordenada na origem. Contudo, numa maneira geral o modelo *EVT6* é menos enviesado e mais preciso para um maior número de classes de dimensão consideradas. No entanto, como as equações de volume total se destinam essencialmente à predição do volume na fase adulta parece-nos lógico optar pelo modelo *EVT7* sem ordenada na origem, sempre que o número de árvores nas classes de diâmetro superiores o justifique.

Quadro 4.9: Média dos resíduos de predição e média do valor absoluto dos resíduos de predição, por classes de diâmetro  $d$  e altura  $h$ , para as equações de volume total com casca.

Mod.	Classes de diâmetro (cm)										
	10 (n=1)	15 (n=4)	20 (n=3)	25 (n=4)	30 (n=5)	35 (n=4)	40 (n=6)	45 (n=5)	50 (n=3)	55 (n=3)	60 (n=1)
EVT1	0,0046	0,0069	0,0063	-0,0008	0,0390	0,0880	0,1495	0,0930	0,2635	0,2890	-0,3460
	0,0046	0,0132	0,0063	0,0325	0,0406	0,0880	0,1495	0,0930	0,2635	0,2890	0,3460
EVT2	0,0044	0,0063	0,0050	-0,0023	0,0364	0,0835	0,1445	0,0853	0,2541	0,2763	-0,3658
	0,0044	0,0129	0,0050	0,0326	0,0390	0,0835	0,1445	0,0853	0,2541	0,2763	0,3658
EVT3	0,0086	0,0140	0,0160	0,0173	0,0561	0,0956	0,1610	0,0842	0,2465	0,2464	-0,4722
	0,0086	0,0166	0,0160	0,0411	0,0561	0,0956	0,1610	0,0842	0,2465	0,2464	0,4722
EVT4	0,0100	0,0100	0,0088	-0,0023	0,0347	0,0835	0,1407	0,0888	0,2617	0,3015	-0,2878
	0,0100	0,0147	0,0088	0,0325	0,0377	0,0835	0,1407	0,0888	0,2617	0,3015	0,2878
EVT6	-0,0036	0,0049	0,0114	0,0113	0,0530	0,0991	0,1547	0,0830	0,2310	0,2206	-0,4457
	0,0036	0,0117	0,0114	0,0381	0,0530	0,0991	0,1547	0,0830	0,2310	0,2206	0,4457
EVT7	0,0110	0,0182	0,0226	0,0190	0,0565	0,0980	0,1482	0,0687	0,2076	0,1860	-0,4877
	0,0110	0,0185	0,0226	0,0416	0,0565	0,0980	0,1482	0,0687	0,2076	0,2036	0,4877
EVT8	0,0079	0,0139	0,0165	0,0188	0,0578	0,0979	0,1584	0,0828	0,2367	0,2281	-0,4693
	0,079	0,0165	0,0165	0,0418	0,0578	0,0979	0,1584	0,0828	0,2367	0,2281	0,4693
Mod.	Classes de altura (m)										
	12 (n=1)	14 (n=4)	16 (n=2)	18 (n=1)	20 (n=2)	22 (n=9)	24 (n=8)	26 (n=8)	28 (n=2)	30 (n=2)	
EVT1	0,0046	0,0035	0,0133	0,0601	0,0477	0,0356	0,0311	0,1775	0,2883	0,2506	
	0,0046	0,0098	0,0133	0,0601	0,0477	0,0513	0,1176	0,1775	0,2883	0,2506	
EVT2	0,0044	0,0027	0,0124	0,0546	0,0439	0,0329	0,0241	0,1693	0,2788	0,2435	
	0,0044	0,0093	0,0124	0,0546	0,0439	0,0499	0,1155	0,1693	0,2788	0,2435	
EVT3	0,0086	0,0103	0,0218	0,0545	0,0491	0,0500	0,0195	0,1650	0,2731	0,2601	
	0,0086	0,0129	0,0218	0,0545	0,0491	0,0605	0,1376	0,1650	0,2731	0,2601	
EVT4	0,0070	0,0067	0,0161	0,0614	0,0489	0,0327	0,0341	0,1764	0,2859	0,2429	
	0,0070	0,0114	0,0161	0,0614	0,0489	0,0499	0,1060	0,1764	0,2859	0,2429	
EVT6	-0,0036	0,0029	0,0145	0,0710	0,0550	0,0477	0,0222	0,1576	0,2508	0,2105	
	0,0036	0,0097	0,0145	0,0710	0,0550	0,0596	0,1337	0,1576	0,2508	0,2105	
EVT7	0,0109	0,0159	0,0270	0,0715	0,0585	0,0519	0,0124	0,1403	0,2255	0,1859	
	0,0109	0,0161	0,0270	0,0715	0,0585	0,0619	0,1343	0,1469	0,2255	0,1859	
EVT8	0,0079	0,0100	0,0223	0,0591	0,0526	0,0520	0,0206	0,1605	0,2598	0,2327	
	0,0079	0,0126	0,0223	0,0591	0,0526	0,0622	0,1379	0,1605	0,2598	0,2327	

Em termos médios, a fase de validação demonstrou que em geral o modelo *EVT7* é ligeiramente menos enviesado (com um desvio médio de  $0,0725 m^3$ ) e mais preciso (com uma precisão média de  $0,1012 m^3$ ) do que o modelo *EVT6* (desvio médio de  $0,0772 m^3$  e precisão média de  $0,1036 m^3$ ) e *EVT2* (desvio médio de  $0,0787 m^3$  e precisão média de  $0,1021 m^3$ ), embora se mantenham muito próximos. Estes modelos

têm a particularidade de subestimar o volume total com casca uma vez que apresentam um enviesamento predominantemente positivo. Contudo estes resultados devem ser vistos com alguma reserva uma vez que o ficheiro de validação, embora independente, é constituído apenas por 39 árvores abatidas.

Assim, comparando os erros cometidos pelos modelos *EVT2* (modelo de Spurr não linear) e *EVT6* (modelo de Spurr linear com ordenada na origem) verifica-se alguma superioridade do modelo *EVT2*, embora com maior colinearidade. Se a comparação for efectuada com o modelo *EVT7*, a superioridade do modelo *EVT2* é ainda mais evidente verificando-se a supremacia do modelo *EVT7* apenas nas classes de 45, 50 e 55 cm.

Se considerarmos a validação com estatísticas derivadas dos resíduos *PRESS* para o conjunto de dados de ajustamento verificamos que em termos médios os modelos possuem menor enviesamento, mas de sinal contrário, ou seja, os modelos sobrestimam ligeiramente apresentando o modelo *EVT2* menor desvio médio e maior precisão, relativamente aos outros dois. Analisando os prós e contras dos diferentes modelos a nossa selecção recai sobre o modelo *EVT6* para povoamentos mais jovens e *EVT7* para os povoamentos adultos, uma vez que o modelo *EVT2* apresenta um maior risco de colinearidade, com um número de condição de matriz muito próximo do limite máximo (1000) considerado aceitável (Myers, 1986).

Nunes (2001) selecciona para o castanheiro em alto fuste, na mesma região em estudo, os modelos de Spurr *EVT2* e *EVT6* como os melhores nas suas categorias (não linear e linear, respectivamente), com vista à obtenção do volume total com casca. No final opta pelo modelo não linear *EVT2*. É de referir que os dados utilizados para a sua obtenção correspondem aos volumes obtidos por cubagem rigorosa com telerelascópio em 126 árvores das parcelas de estudo permanentes de Bornes, Marão e Padrela, medidas em 1990 e 1992, que fazem parte também do nosso ficheiro de dados.

O modelo *EVT6* foi seleccionado igualmente por Alegria (1994) para o pinheiro bravo.

Seguidamente apresentam-se os três melhores modelos seleccionados para a predição do volume total do tronco sobre casca, por ordem de seriação:

$$EVT6: v = 0,015160 + 0,0000324 d^2 h;$$

$$EVT7: v = 0,00003299 d^2 h;$$

$$EVT2: v = 0,000052(d^2 h)^{0,95710};$$

Como se pode ver na Figura 4.1 as previsões obtidas com os três modelos para o conjunto de validação 2 são semelhantes, havendo uma sobreposição das estimativas. Observa-se o afastamento da linha de regressão correspondente a uma dispersão dos valores estimados para um volume observado de  $2,7 m^3$ , relativo à árvore 4 da Padrela, para a qual é estimado um volume à volta de  $3 m^3$ . Trata-se de uma árvore que pode ser considerada de bordadura com uma altura relativamente baixa para a classe de diâmetro a que pertence (60 cm) e por isso um ponto com pior ajustamento por parte dos modelos, mas todos eles com comportamento semelhante. Tendo em conta o posicionamento desta árvore a sua inclusão no ficheiro de dados é discutível. Porém, como se tratava de um exemplar único difícil de obter nesta classe de dimensão, associado a um reduzido número de árvores abatidas, optou-se pela sua não exclusão do ficheiro de dados, até porque a reduzida dimensão dos povoamentos, associados a algumas clareiras, leva a que uma elevada percentagem de árvores ocupem esta posição pelo que a sua inclusão proporciona modelos mais próximos da realidade. Em face do conjunto de validação utilizado, com as limitações já referidas, poderemos dizer que é possível utilizar qualquer um destes três modelos seleccionados embora a nossa preferência incida nos modelos *EVT6* ou *EVT7*, dependendo das situações, por apresentarem menor colinearidade.

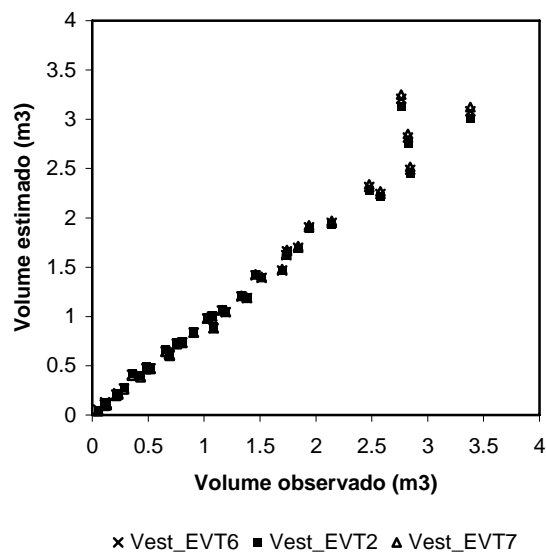


Figura 4.1: Volume estimado em função do volume observado, para os três modelos melhor classificados (EVT6, EVT2 e EVT7).

### *Equações de volume comercial sem casca*

Para o ajustamento das equações do volume comercial sem casca foram ajustadas ao conjunto de dados 3, as mesmas equações utilizadas para o volume total com casca. O modelo *EVT5* não é apresentado uma vez que o coeficiente  $\beta_0$  não se mostrou significativo sendo por isso equivalente ao modelo *EVT1*.

No Quadro 4.10 são apresentadas as estatísticas de ajustamento e capacidade preditiva calculadas para cada modelo usando o diâmetro sem casca, após ponderação pela função influência de Huber e o factor  $d_{sc}^2 * h_m$ , sendo  $h_m$  a altura mercantil.

Quadro 4.10: Medidas de ajustamento e capacidade preditiva dos modelos de volume comercial sem casca, usando o diâmetro também sem casca, após ponderação (função influência de Huber e  $d_{sc}^2 h_m$ ).

Modelo	QMR	EM	mPRESS	maPRESS	$R^2_{pred}$	P95	P5	NCOND	
		Modelos não lineares (n=125)							
EVT1	0,6802 10 <sup>-6</sup>	0,9308	0,0062	0,1100	0,8937	0,2720	-0,1960	2102,4024	
EVT2	0,1052 10 <sup>-6</sup>	0,8934	0,0108	0,1327	0,8590	0,3004	-0,2443	1429,6152	
EVT3	0,7414 10 <sup>-6</sup>	0,9248	0,0041	0,1160	0,8740	0,2399	-0,2055	32,9599	
EVT4	0,1466 10 <sup>-6</sup>	0,8548	0,0122	0,1535	0,7890	0,3853	-0,3359	106,4114	
		Modelos lineares (n=125)							VIF
EVT6	1,1200 10 <sup>-6</sup>	0,8868	0,0116	0,1350	0,8460	0,3091	-0,2595	1,0000	
EVT7	1,5100 10 <sup>-6</sup>	0,9703	0,0065	0,1571	0,7701	0,3336	-0,3319	1,0000	
EVT8	0,7301 10 <sup>-6</sup>	0,9860	0,0017	0,1141	0,8792	0,2475	-0,2286	7,4121	

Com a aplicação dos índices de selecção obteve-se a seguinte ordenação (por ordem crescente, do melhor para o pior):

*Modelos não lineares – EVT1, EVT3, EVT2 e EVT4;*

*Modelos lineares – EVT8, EVT6 e EVT7.*

Tanto o modelo *EVT1* como o modelo *EVT2* possuem números de condição de matriz superiores a 1000 e por isso com maior risco das predições virem a ser afectadas pela colinearidade.

Os modelos pré-seleccionados são os seguintes:

$$EVT1: v_{m_{sc}} = 0,2860 10^{-3} d_{sc}^{1,8406} h_m^{0,5672};$$

$$EVT3: v_{m_{sc}} = d_{sc}^2 / (692,6000 + 9851,7000/h_m);$$

$$EVT8: v_{m_{sc}} = d_{sc}^2 (0,2471 10^{-3} + 0,3251 10^{-4} h_m).$$

Para clarificar melhor o desempenho dos modelos pré seleccionados, em termos de predição, foi efectuada a análise do respectivo enviesamento e precisão por classes

de diâmetro à altura do peito ( $d$ ) e por classes de altura mercantil ( $hm$ ) (vide Quadro 4.11). Esta análise é baseada nas estatísticas  $mPRESS$  e  $maPRESS$  de predição dos modelos de volume comercial sem casca ( $v_{m\_sc}$ ).

Quadro 4.11: Média dos resíduos de predição e média do valor absoluto dos resíduos de predição, por classes de diâmetro  $d$  e altura mercantil  $hm$ , para as equações de volume comercial sem casca.

Mod.	Classes de diâmetro (cm)								
	20 (n=2)	25 (n=7)	30 (n=20)	35 (n=29)	40 (n=27)	45 (n=22)	50 (n=9)	55 (n=5)	60 (n=4)
EVT1	-0,0159  0,0159	-0,0193  0,0529	-0,0056  0,0567	-0,0013  0,1067	0,0267  0,1161	0,0670  0,1417	0,0129  0,1067	-0,2457  0,2606	0,0011  0,1498
EVT3	0,0122  0,0122	0,0086  0,0530	0,0231  0,0634	0,0164  0,1079	0,0341  0,1207	0,0516  0,1323	-0,0450  0,1101	-0,3486  0,3486	-0,1043  0,2010
EVT8	0,0225  0,0225	0,0193  0,0474	0,0262  0,0651	0,0187  0,0990	0,0229  0,1169	0,0323  0,1388	-0,0222  0,1059	-0,3479  0,3479	-0,1073  0,2016
Mod.	Classes de altura mercantil (m)								
	4 (n=2)	6 (n=13)	8 (n=5)	10 (n=17)	12 (n=20)	14 (n=13)	16 (n=32)	18 (n=14)	20 (n=9)
EVT1	-0,0588  0,0588	0,0883  0,1203	-0,0394  0,0880	-0,0198  0,0928	0,0098  0,0630	-0,0720  0,1435	-0,0088  0,1192	0,0845  0,1367	0,0124  0,1323
EVT3	0,0065  0,0115	0,0830  0,1183	-0,0357  0,0710	-0,0360  0,0971	0,0072  0,0649	-0,0814  0,1449	-0,0230  0,1409	0,0989  0,1430	0,0533  0,1380
EVT8	0,1249  0,1249	0,0655  0,1183	-0,0177  0,0765	0,0002  0,0886	0,0343  0,0677	-0,0619  0,1388	-0,0246  0,1404	0,0613  0,1257	-0,0290  0,1303

O modelo  $EVT1$  apresenta um menor enviesamento para um maior número de classes de diâmetro bem como uma maior precisão. No entanto, quando se analisam estes parâmetros por classe de altura o modelo  $EVT8$  é superior aos restantes com um menor enviesamento e maior precisão para um maior número de classes, logo seguido do modelo  $EVT1$ . No final optámos pelo modelo  $EVT8$  com menor colinearidade.

As equações seleccionadas para a estimação do volume comercial sem casca foram também ajustadas com o diâmetro com casca, obtendo-se as seguintes equações:

$$EVT1: v_{m\_sc} = 0,1930 \cdot 10^{-3} d^{1,9167} hm^{0,5665};$$

$$QMR = 0,5842 \cdot 10^{-6} \quad EM = 0,9335 \quad mPRESS = 0,0034 \quad maPRESS = 0,1077$$

$$EVT3: v_{m\_sc} = d^2 / (786,2000 + 10986,2000/hm);$$

$$QMR = 0,6182 \cdot 10^{-6} \quad EM = 0,9293 \quad mPRESS = 0,0039 \quad maPRESS = 0,1108$$

$$EVT8: v_{m\_sc} = d^2 (0,2230 \cdot 10^{-3} + 0,2870 \cdot 10^{-4} hm).$$

$$QMR = 0,5928 \cdot 10^{-6} \quad EM = 0,9873 \quad mPRESS = 0,0009 \quad maPRESS = 0,1078$$

### 4.3.2. Equações de volume percentual

Os modelos apresentados na secção 4.1.2.3., Quadro 4.4 foram ajustados ao conjunto de dados 1' e validados com o conjunto de dados 2', de acordo com a metodologia descrita. Os mesmos modelos foram ajustados ao conjunto de dados 3', relativo às árvores abatidas em corte final, para obtenção de equações de volume percentual sem casca tendo como referência, não o volume total, mas o volume comercial.

#### *Equações de volume percentual com casca em função de $h_i$*

No Quadro 4.12 apresentam-se os valores das estatísticas de ajustamento e predição, calculadas para o conjunto de dados de ajustamento das equações de volume percentual com casca, para uma determinada altura de desponta, após ponderação pela função influência de Huber com  $r=1$ .

Quadro 4.12: Medidas de ajustamento e predição dos modelos de volume percentual sobre casca em função de uma altura de desponta, após *IRWLS* (fase de ajustamento).

Modelo	QMR	EM	mPRESS	maPRESS	$R^2_{pred}$	P95	P5	NCOND
Número de observações (n=3690)								
EVPH1	0,868 $10^{-3}$	0,9872	0,0025	0,0271	0,9792	0,0683	-0,0544	3090,5862
EVPH2	0,866 $10^{-3}$	0,9872	0,0018	0,0269	0,9788	0,0713	-0,0527	1,7879 $10^8$
EVPH3	0,868 $10^{-3}$	0,9872	0,0017	0,0270	0,9790	0,0683	-0,0544	1934,8555
EVPH4	0,963 $10^{-3}$	0,9856	0,0034	0,0285	0,9771	0,0721	-0,0573	1,0000
EVPH5	0,0011	0,9830	-0,0028	0,0306	0,9737	0,0766	-0,0631	10,1603
EVPH6	0,0011	0,9834	-0,0030	0,0304	0,9742	0,0740	-0,0628	2326,2828
EVPH7	0,0010	0,9843	0,0011	0,0307	0,9752	0,0814	-0,0488	180,3401

Como se pode observar no Quadro 4.12 o ajustamento das equações de predição da razão  $R$  entre o volume mercantil para uma determinada altura de desponta e o volume total com casca, incluindo o cepo, demonstrou, de uma maneira geral, que aos modelos com maior complexidade está associada não só uma melhor qualidade do ajustamento e capacidade preditiva, ainda que pouco expressiva, mas também uma elevada colinearidade. Assim, embora os modelos *EVPH2*, *EVPH1* e *EVPH3*, por ordem crescente, apresentem um índice de ordenação mais baixo do que os restantes modelos não lineares, estes modelos apresentam um número de condição de matriz (*NCOND*) muito elevado. Contrariamente os modelos *EVPH4* e *EVPH5*, com índices de

ordenação mais elevados e logicamente com qualidades de ajustamento e predição inferiores, apresentam valores do número de condição de matriz bastante baixos.

Um dos efeitos da multicolinearidade é a instabilidade dos coeficientes de regressão, *i. e.*, os coeficientes são muito dependentes do conjunto de dados particular que os originaram (Myers, 1986). Na presença de multicolinearidade, segundo o autor, podem-se continuar a obter boas predições dentro dos limites dos dados. No entanto, as predições para extrapolações fora da série de dados podem ser afectadas desfavoravelmente.

Para melhor se avaliar a capacidade preditiva dos modelos procedeu-se à validação dos modelos com o conjunto de dados 2', já referido. No Quadro 4.13 são apresentados os resultados da validação dos modelos para este conjunto de dados. Esta validação é baseada na comparação dos valores de  $R=v_m/v$  observados e estimados pelos modelos.

Quadro 4.13: Medidas da capacidade preditiva resultantes do processo de validação para as equações de volume percentual com casca em função da altura de despona (fase de validação).

Modelo	QMrp	R <sup>2</sup> rp	mrp	marp	Vrp
Número de observações – conjunto de dados 2' (n=330)					
EVPH1	0,0012	0,9842	-0,0218	0,0269	0,0007
EVPH2	0,0007	0,9905	-0,0044	0,0225	0,0007
EVPH3	0,0012	0,9842	-0,0226	0,0271	0,0007
EVPH4	0,0013	0,9828	-0,0218	0,0272	0,0008
EVPH5	0,0016	0,9785	-0,0284	0,0324	0,0008
EVPH6	0,0016	0,9796	-0,0273	0,0288	0,0008
EVPH7	0,0013	0,9833	-0,0256	0,0313	0,0006

Tendo em conta a análise do Quadro 4.13 verifica-se que os modelos *EVPH2*, *EVPH1* e *EVPH3*, por esta ordem, são aqueles que apresentam menores índices de ordenação e conseqüentemente menores erros de predição, apesar da sua elevada colinearidade. De qualquer forma, apesar de não existir uma diferença muito expressiva entre os diferentes modelos considerados na análise, observa-se alguma superioridade dos dois primeiros modelos (*EVPH1* e *EVPH2*).

Para clarificar a situação relativa à capacidade preditiva dos modelos analisou-se a sua precisão e enviesamento por classes de altura de despona (*hi*) (Quadro 4.14), com

vista à selecção da equação com melhor desempenho quando aplicada a um conjunto de dados independente.

Quadro 4.14: Média dos resíduos de predição e média do valor absoluto dos resíduos de predição, por classes de altura de despona  $h_i$ , para as equações de volume percentual com casca em função de  $h_i$  (fase de validação).

Mod.	Classes de altura de despona (m) - conjunto de dados 2'												
	2 (n=39)	4 (n=39)	6 (n=39)	8 (n=39)	10 (n=35)	12 (n=32)	14 (n=29)	16 (n=6)	18 (n=31)	20 (n=24)	22 (n=9)	24 (n=5)	≥ 26 (n=3)
EVPH1	-0,0205  0,0219	-0,0351  0,0364	-0,0384  0,0422	-0,0295  0,0384	-0,0298  0,0379	-0,0203  0,0287	-0,0115  0,0192	-0,0150  0,0239	-0,0066  0,0109	-0,0018  0,0054	-0,0009  0,0047	0,0002  0,0017	0,0004  0,0004
EVPH2	-0,0010  0,0120	-0,0121  0,0223	-0,0073  0,0255	-0,0023  0,0257	-0,0002  0,0252	0,0055  0,0238	0,0129  0,0219	0,0099  0,0251	0,0187  0,0213	0,02359  0,0241	0,0237  0,0237	0,0247  0,0247	0,0219  0,0219
EVPH3	-0,0291  0,0293	-0,0262  0,0295	-0,0342  0,0390	-0,0304  0,0387	-0,0328  0,0395	-0,0237  0,0304	-0,0143  0,0203	-0,0176  0,0246	-0,0084  0,0114	-0,0031  0,0054	-0,0019  0,0046	-0,0006  0,0018	-0,0001  0,0002
EVPH4	0,0047  0,0124	-0,0274  0,0306	-0,0406  0,0439	-0,0359  0,0423	-0,0382  0,0430	-0,0280  0,0330	-0,0176  0,0220	-0,0206  0,0261	-0,0104  0,0123	-0,0041  0,0058	-0,0028  0,0048	-0,0011  0,0020	-0,0002  0,0002
EVPH5	-0,0584  0,0588	-0,0151  0,0241	-0,0176  0,0295	-0,0272  0,0358	0,0401  0,0437	-0,0399  0,0405	-0,0317  0,0317	-0,0331  0,0333	-0,0201  0,0202	-0,0101  0,0101	-0,0075  0,0075	-0,0045  0,0045	-0,0018  0,0018
EVPH6	0,0578  0,0578	-0,0139  0,0221	-0,0157  0,0282	-0,0255  0,0346	-0,0380  0,0423	-0,0386  0,0395	-0,0310  0,0311	0,0324  0,0326	-0,0198  0,0199	-0,0100  0,0100	-0,0074  0,0074	-0,0045  0,0045	-0,0017  0,0017
EVPH7	-0,0431  0,0432	-0,0285  0,0328	-0,0212  0,0315	-0,0159  0,0305	-0,0197  0,0320	-0,0212  0,0287	-0,0235  0,0255	-0,0301  0,0301	-0,0285  0,0285	-0,0275  0,0275	-0,0270  0,0270	-0,0265  0,0265	-0,0254  0,0254

A análise do Quadro 4.14, relativo à distribuição dos erros de predição por classes de altura de despona, para o conjunto de validação 2', põe em evidência os modelos *EVPH1* e *EVPH2* os quais apresentam alguma superioridade relativamente aos restantes. Estes modelos oferecem um maior número de classes para as quais as predições obtidas são menos enviesadas, relativamente aos restantes. Assim, enquanto o modelo *EVPH2* se ajusta melhor à parte inferior do tronco (até  $h_i = 12$  m), com menores desvios por excesso e maior precisão relativamente aos restantes para esta gama de alturas, o modelo *EVPH1* tem uma melhor prestação para alturas de despona superiores a 12 m. A partir deste nível o modelo *EVPH2* subestima o volume percentual, enquanto o modelo *EVPH1* o sobrestima para a maioria das classes.

Os modelos com menor colinearidade *EVPH4* e *EVPH5* apresentam uma capacidade preditiva inferior aos modelos *EVPH1* e *EVPH2* sendo, por isso, mais enviesados e menos precisos do que estes, apresentando estimativas por excesso para a generalidade das classes.

Os modelos analisados têm tendência para sobrestimar o volume percentual com casca em função da altura de despona, à excepção do modelo *EVPH2*, embora com

desvios médios inferiores a 3 % e um desvio médio máximo por classe de  $h_i$  inferior a 6%, observado para a parte inferior do tronco. Duma maneira geral, verifica-se uma tendência para a diminuição do enviesamento e aumento da precisão com a subida da altura de despona, exceptuando-se mais uma vez o modelo *EVPH2*. Para o modelo *EVPH1*, por exemplo, acima dos 12 m de altura de despona o enviesamento médio da razão de volumes por classe de  $h_i$  é inferior a 1,5 % enquanto para o modelo *EVPH2* é inferior a 2,5 %.

De seguida, apresentam-se as equações que obtiveram um melhor desempenho para a predição do volume percentual com casca em função de uma altura de despona, *EVPH1* com maior colinearidade e *EVPH4* com menor colinearidade:

$$EVPH1: R=1+[-0,8075(h-h_i)^{2,7922}/h^{2,7359}];$$

$$EVPH4: R=1-((h-h_i)/h)^{2,9340}.$$

#### ***Equações de volume percentual com casca em função de di***

No Quadro 4.15 apresentam-se os valores das estatísticas de ajustamento e predição, calculadas para o conjunto de dados de ajustamento das equações de volume percentual com casca, para um determinado diâmetro de despona, após ponderação pela função influência de Huber com  $r=1$ .

Tendo em conta a análise do referido quadro verifica-se que os modelos, *EVPD5*, *EVPD6* e *EVPD3*, por esta ordem, são aqueles que apresentam menores índices de ordenação. No entanto estes modelos possuem elevada colinearidade, principalmente os dois primeiros. Uma vez que não existe uma diferença muito expressiva entre estes três modelos será preferível optar pelo modelo *EVPD3* com menor colinearidade. O modelo *EVPD4* possui um número de condição de matriz muito baixo mas, em contrapartida, os gráficos de resíduos studentizados vs. valores estimados e em papel de probabilidades normal são ligeiramente piores do que os do modelo *EVPD3*, assim como o valor das estatísticas de ajustamento e predição. Os modelos *EVPD1* e *EVPD2* têm um comportamento muito semelhante mas também elevada colinearidade e um índice de ordenação superior ao modelo *EVPD3*.

O modelo linear *EVPD8* não mostrou superioridade relativamente aos não lineares para além de possuir uma forte colinearidade.

Quadro 4.15: Medidas de ajustamento e predição dos modelos de volume percentual sobre casca em função de um diâmetro de despona, após *IRWLS* (fase de ajustamento).

Modelo	QMR	EM	mPRESS	maPRESS	$R^2_{pred}$	P95	P5	NCOND
Número de observações (n=3690)								
EVPD1	0,0025	0,9629	$0,2896 \cdot 10^{-4}$	0,0441	0,9376	0,1122	-0,1076	4279,3834
EVPD2	0,0025	0,9629	$0,2896 \cdot 10^{-4}$	0,0441	0,9376	0,1122	-0,1076	4279,3848
EVPD3	0,0022	0,9671	$0,1156 \cdot 10^{-4}$	0,0416	0,9431	0,1087	-0,1051	1841,9179
EVPD4	0,0028	0,9571	-0,0037	0,0476	0,9320	0,1233	-0,1049	6,0185
EVPD5	0,0022	0,9673	-0,0005	0,0415	0,9437	0,1083	-0,1068	6154,2454
EVPD6	0,0022	0,9674	-0,0005	0,0414	0,9437	0,1080	-0,1069	$4,1826 \cdot 10^{12}$
EVPD7	0,0027	0,9585	-0,0036	0,0470	0,9333	0,1257	-0,1039	3188,4573
EVPD8	0,0026	0,9615	0,0005	0,0451	0,9362	0,1138	-0,1066	$3,9845 \cdot 10^8$

Os modelos obtidos foram validados com um conjunto de dados independentes (conjunto 2'). Os resultados das estatísticas de validação calculadas são apresentados no Quadro 4.16. É de referir que também aqui a validação é baseada na comparação dos valores de  $R=v_m/v$  observados e estimados pelos modelos.

Quadro 4.16: Medidas de predição resultantes do processo de validação para as equações de volume percentual com casca em função do diâmetro de despona (fase de validação).

Modelo	QM <sub>rp</sub>	$R^2_{rp}$	m <sub>rp</sub>	ma <sub>rp</sub>	V <sub>rp</sub>
Número de observações – conjunto de dados 2' (n=330)					
EVPD1	0,0027	0,9646	-0,0034	0,0370	0,0027
EVPD2	0,0027	0,9646	-0,0034	0,0370	0,0027
EVPD3	0,0024	0,9684	-0,0076	0,0346	0,0024
EVPD4	0,0034	0,9564	-0,0002	0,0406	0,0034
EVPD5	0,0023	0,9689	-0,0068	0,0341	0,0023
EVPD6	0,0024	0,9687	-0,0067	0,0342	0,0024
EVPD7	0,0032	0,9584	0,0013	0,0399	0,0032
EVPD8	0,0038	0,9505	0,0024	0,0391	0,0029

Observando o Quadro 4.16 obtém-se uma ordenação semelhante à obtida na fase de ajustamento. Assim, os modelos *EVPD5*, *EVPD6* e *EVPD4* são os melhor classificados, por ordem decrescente.

Para clarificar melhor a situação relativa à capacidade preditiva dos modelos analisou-se a sua precisão e enviesamento por classes de diâmetro de despona  $d_i$

(Quadro 4.17), com vista à selecção da equação com melhor desempenho quando aplicada a um conjunto de dados independente.

Quadro 4.17: Média dos resíduos de predição e média do valor absoluto dos resíduos de predição, por classes de diâmetro de despona  $d_i$ , para as equações de volume percentual com casca em função de  $d_i$ .

Mod.	Classes de diâmetro de despona (cm) - conjunto de dados 2'											
	5 (n=23)	10 (n=52)	15 (n=47)	20 (n=44)	25 (n=37)	30 (n=40)	35 (n=36)	40 (n=18)	45 (n=18)	50 (n=7)	55 (n=7)	60 (n=1)
EVPD1	0,0070  0,0082	0,0097  0,0174	-0,0027  0,0309	0,0064  0,0329	0,0121  0,0478	0,0158  0,0528	0,0004  0,0503	0,0234  0,0527	-0,0105  0,0548	-0,0054  0,0403	0,0231  0,0453	-0,0026  0,0026
EVPD2	0,0070  0,0082	0,0097  0,0174	-0,0027  0,0309	0,0064  0,0329	0,0121  0,0478	0,0158  0,0527	0,0004  0,0503	-0,0234  0,0527	-0,0105  0,0548	-0,0054  0,0403	-0,0230  0,0453	-0,0026  0,0026
EVPD3	0,0070  0,0076	0,0074  0,0154	-0,0050  0,0326	0,0082  0,0321	0,0205  0,0445	0,0247  0,0483	0,0083  0,0466	-0,0125  0,0453	0,0027  0,0484	0,0109  0,0395	-0,0126  0,0363	-0,0236  0,0236
EVPD4	0,0033  0,0100	0,0081  0,0248	-0,0033  0,0285	0,0032  0,0307	0,0152  0,0440	0,0169  0,0569	0,0005  0,0506	-0,0320  0,0669	-0,0237  0,0677	-0,0289  0,0670	-0,0543  0,0725	-0,0756  0,0756
EVPD5	0,0059  0,0073	0,0068  0,0158	-0,0046  0,0309	0,0080  0,0316	0,0212  0,0445	0,0244  0,0482	0,0058  0,0467	-0,0132  0,0434	-0,0014  0,0487	0,0069  0,0348	-0,0154  0,0344	-0,0254  0,0254
EVPD6	0,0058  0,0072	0,0063  0,0156	-0,0052  0,0312	0,0078  0,0316	0,0208  0,0449	0,0243  0,0487	0,0063  0,0469	-0,0129  0,0436	-0,0006  0,0483	0,0076  0,0346	-0,0142  0,0346	-0,0197  0,0197
EVPD7	0,0011  0,0081	0,0014  0,020	-0,0118  0,0306	-0,0008  0,0311	0,0140  0,0464	0,0208  0,0582	0,0091  0,0512	-0,0192  0,0665	-0,0063  0,0614	-0,0072  0,0656	-0,0292  0,0625	-0,0469  0,0469
EVPD8	0,0097  0,0127	0,0174  0,0241	0,0062  0,0296	0,0094  0,0306	0,0144  0,0437	0,0137  0,0516	-0,0076  0,0506	-0,0346  0,0565	-0,0304  0,0679	-0,0331  0,0544	-0,0551  0,0615	-0,0480  0,0480

Analisando o Quadro 4.17 verifica-se que os modelos *EVPD1* e *EVPD2* apresentam um maior número de classes com menor enviesamento. Relativamente à precisão, a diferença entre os modelos é menos nítida. Assim, o modelo *EVPD6* apresenta o maior número de classes com maior precisão (4 classes) logo seguido dos modelos *EVPD4* e *EVPD5*, ambos com 3 classes. De uma maneira geral, os erros médios de predição e em valor absoluto por classe são relativamente baixos para qualquer modelo, sendo o modelo *EVPD4* aquele que possui um valor extremo de enviesamento mais elevado e maior variabilidade do erro, podendo atingir os 7%.

Comparando os dois modelos com menor colinearidade *EVPD3* e *EVPD4*, pré-seleccionados anteriormente, verifica-se que o modelo *EVPD4* possui um maior número de classes com menor enviesamento enquanto o modelo *EVPD3* possui um maior número de classes com maior precisão. Assim, o modelo *EVPD4* é considerado menos enviesado mas também menos preciso do que o modelo *EVPD3*, além de possuir valores extremos também mais elevados.

De seguida apresentam-se as equações previamente seleccionadas para a predição do volume percentual sobre casca em função de um diâmetro de despona:

$$EVPD3: R = 1 - [1 - \exp(-0,8525 \tan(0,9682 h^{0,0847} (di/d))) ]^{3,1504};$$

$$EVPD4: R = \exp[-1,4039(di/d)^{4,3716}].$$

### ***Equações de volume percentual sem casca em função de hi***

No Quadro 4.18 são apresentados os resultados do ajustamento e predição dos modelos percentuais sem casca em função de uma altura de despona, após ponderação pela função influência de Huber com  $r=1$ . Para esta modalidade o modelo *EVPH2* não é apresentado uma vez que os coeficientes obtidos não são significativos.

Quadro 4.18: Medidas de ajustamento e predição dos modelos de volume percentual sob casca em função de uma altura de despona, após *IRWLS*.

Modelo	QMR	EM	mPRESS	maPRESS	R <sup>2</sup> <sub>pred</sub>	P95	P5	NCOND
Número de observações (n=547)								
EVPH1	0,0012	0,9836	0,0003	0,0320	0,9742	0,0749	-0,0639	1190,5498
EVPH3	0,0011	0,9840	0,0012	0,0317	0,9748	0,0735	-0,0647	900,3763
EVPH4	0,0016	0,9775	0,0015	0,0377	0,9659	0,0828	-0,0781	1
EVPH5	0,0019	0,9722	-0,0061	0,0419	0,9601	0,0863	-0,0857	8,9746
EVPH6	0,0017	0,9742	-0,0056	0,0400	0,9631	0,0831	0,0809	852,0551
EVPH7	0,0013	0,9822	0,0001	0,0330	0,9716	0,0715	-0,0760	193,6472

A aplicação dos índices de ordenação conduziu à seguinte seriação dos modelos não lineares por ordem decrescente (ao menor somatório corresponde o melhor modelo):

- *EVPH3, EVPH1, EVPH4, EVPH6 e EVPH5*.

Os modelos *EVPH5* e *EVPH6* apresentam gráficos de resíduos studentizados vs. valores estimados e em papel de probabilidades normal ligeiramente inferiores aos restantes.

De seguida, faz-se a distribuição, por classes de altura de despona, da média e média do valor absoluto dos resíduos *PRESS* dos três modelos melhor posicionados (*EVPH3 EVPH1* e *EVPH4*) com vista à selecção do melhor modelo (Quadro 4.19).

Como se pode observar no Quadro 4.19 o modelo *EVPH1* é menos enviesado para um maior número de classes de *hi* do que os restantes. Por sua vez o modelo *EVPH3* é o modelo mais preciso igualmente para um maior número de classes de *hi*. Assim, se tivermos em conta a colinearidade dos modelos verificamos que o modelo

*EVPH1* possui um número de condição de matriz superior ao razoável e por esta razão deveremos optar pelo modelo mais preciso *EVPH3* com menor colinearidade. O enviesamento médio máximo deste modelo é inferior a 2 % e a variabilidade máxima do erro ronda os 4 %.

O modelo *EVPH4* é o modelo com menor colinearidade mas por sua vez com maior enviesamento e menor precisão.

Quadro 4.19: Média dos resíduos *mPRESS* e *maPRESS*, por classes de altura de despona *hi*, para as equações de volume percentual sem casca em função de *hi*.

Mod.	Classes de altura de despona (m)								
	2 (n=123)	4 (n=107)	6 (n=96)	8 (n=55)	10 (n=77)	12 (n=51)	14 (n=27)	16 (n=5)	18 (n=6)
EVPH1	0,0001  0,0282	-0,0005  0,0393	0,0011  0,0381	0,0062  0,0400	-0,0004  0,0307	-0,0022  0,0203	-0,0029  0,0151	-0,0057  0,0149	-0,0061  0,0097
EVPH3	0,0035  0,0277	-0,0063  0,0399	-0,0042  0,0379	0,0075  0,0386	0,0050  0,0296	0,0064  0,0206	0,0040  0,0143	0,0191  0,0097	0,0103  0,0051
EVPH4	0,0222  0,0389	0,0053  0,0468	-0,0045  0,0423	-0,0041  0,0435	-0,0113  0,0342	-0,0118  0,0226	-0,0095  0,0171	-0,0016  0,0119	-0,0114  0,0122
EVPH7	-0,0071  0,0290	-0,0064  0,0424	-0,0009  0,0395	0,0089  0,0396	0,0059  0,0306	0,0078  0,0208	0,0071  0,0145	0,0177  0,0223	0,0049  0,0080

De seguida, apresentam-se as expressões dos modelos que obtiveram um melhor desempenho no processo de validação para a predição do volume percentual em função de uma altura de despona, sem casca e sem cepo, tendo como referência o volume comercial:

$$EVPH1: R=1+[-1,2604(hm-hi)^{1,6435}/hm^{1,7515}]$$

$$EVPH3: R=1-[1-\exp(-0,8031\tan(1,5735hm^{-0,0644}(hm-hi)/hm))]^{1,5762}$$

$$EVPH4: R=1-((hm-hi)/hm)^{1,7857}$$

#### ***Equações de volume percentual sem casca em função de $d_i$***

No Quadro 4.20 são apresentados os resultados do ajustamento e predição dos modelos de volume percentual sem casca em função de um diâmetro de despona, após ponderação pela função influência de Huber com  $r=1$ .

A aplicação dos índices de seriação conduziu à seguinte ordenação dos modelos não lineares:

- *EVPD6*, *EVPD5*, *EVPD3*, *EVPD2*, *EVPD1*, *EVPD4* e *EVPD7*.

É de referir que a maior parte dos modelos possui elevada colinearidade, ainda que com um bom ajustamento e predição. Por este facto são considerados para análise

dos resíduos *PRESS* por classes de diâmetro de despona os modelos posicionados no 2º, 3º e 6º lugares, este último por não possuir colinearidade e os restantes por serem os modelos melhor posicionados de acordo com as estatísticas de ajustamento e predição. Não se considerou na análise o modelo classificado em 1º lugar por possuir um valor extremamente elevado do número de condição de matriz e, por isso, com uma forte tendência para alguns dos coeficientes serem instáveis. Pretende-se assim comparar os modelos com melhor ajustamento e predição, com um modelo pior posicionado mas com menor colinearidade, para melhor se poder balancear os ganhos e as perdas na tomada de decisão final.

Quadro 4.20: Medidas de ajustamento e predição dos modelos de volume percentual sob casca em função de um diâmetro de despona, após *IRWLS*.

Modelo	QMR	EM	mPRESS	maPRESS	R <sup>2</sup> <sub>pred</sub>	P95	P5	NCOND
	Número de observações (n=660)							
EVPD1	0,0065	0,9187	0,0086	0,0734	0,8599	0,2135	-0,1396	9924,4238
EVPD2	0,0064	0,9187	0,0086	0,0734	0,8599	0,2135	-0,1396	9924,4205
EVPD3	0,0055	0,9308	0,0066	0,0685	0,8872	0,1929	-0,1334	2035,6437
EVPD4	0,0070	0,9118	0,0056	0,0756	0,8513	0,2322	-0,1264	4,5128
EVPD5	0,0054	0,9312	0,0065	0,0679	0,8877	0,1923	-0,1322	13203,1457
EVPD6	0,0054	0,9315	0,0062	0,0683	0,8854	0,1938	-0,1349	3,0114 10 <sup>12</sup>
EVPD7	0,0070	0,9119	0,0057	0,0756	0,8511	0,2335	-0,1261	6431,1438
EVPD8	0,0063	0,9204	0,0068	0,0727	0,8641	0,2059	-0,1532	8,0906 10 <sup>7</sup>

No Quadro 4.21 é apresentada a distribuição da média e média do valor absoluto dos resíduos *PRESS* dos modelos não lineares referidos e do modelo linear.

O modelo *EVPD3* apresenta valores extremos do erro mais baixos do que os restantes e o modelo *EVPD4* os valores mais elevados embora seja o modelo que apresente um maior número de classes com menor enviesamento. O modelo *EVPD5* é o modelo mais preciso com um maior número de classes em que a média do valor absoluto dos resíduos é inferior aos restantes. Todos os modelos subestimam para a maioria das classes. Se tivermos em consideração a análise da colinearidade dever-se-á optar pelo modelo *EVPD4* ou ainda pelo modelo *EVPD3* se as predições forem feitas dentro da série de valores utilizados para a sua construção, como é recomendado para este tipo de funções. De uma maneira geral o ganho obtido com o modelo com maior colinearidade não é muito expressivo, salvo para a classe de *di* de 50 cm, onde a vantagem é mais evidente.

Quadro 4.21: Média dos resíduos *mPRESS* e *maPRESS*, por classes de diâmetro de despona *di*, para as equações de volume percentual sem casca em função de *di*.

Mod.	Classes de diâmetro de despona sem casca (cm)										
	10 (n=52)	15 (n=47)	20 (n=44)	25 (n=37)	30 (n=40)	35 (n=36)	40 (n=18)	45 (n=18)	50 (n=7)	55 (n=7)	60 (n=1)
EVPD3	0,0144  0,0146	0,0180  0,0247	0,0083  0,0395	-0,0022  0,0668	0,0097  0,0886	-0,0005  0,0888	0,0232  0,0852	-0,0028  0,0778	0,0093  0,0867	-0,0340  0,0730	-0,0118  0,0359
EVPD4	0,0064  0,0069	0,0064  0,0181	-0,0032  0,0400	-0,0093  0,0721	0,0150  0,0964	0,0063  0,0973	0,0208  0,0989	-0,0069  0,0939	0,0350  0,1119	0,0061  0,0796	-0,0241  0,0575
EVPD5	0,0121  0,0124	0,0152  0,0227	0,0059  0,0398	-0,0042  0,0666	0,0084  0,0887	-0,0022  0,0889	0,0255  0,0842	0,0016  0,0766	0,0181  0,0843	-0,0229  0,0714	0,0041  0,0318
EVPD7	0,0058  0,0083	0,0008  0,0215	-0,0104  0,0461	0,0003  0,0831	0,0076  0,0963	0,0085  0,0966	0,0207  0,1081	0,0206  0,1033	0,0322  0,0805	-0,0188  0,0387	0,0075  0,0637

De seguida, apresentam-se as expressões dos modelos que obtiveram um melhor desempenho no processo de validação para a predição do volume percentual sem casca e sem cepo, tendo como referência o volume comercial, em função de um diâmetro de despona sem casca:

$$EVPD3: R = 1 - [1 - \exp(-0,7831 \tan(1,0502 hm^{0,0778} (di\_sc/d\_sc)))]^{3,6961};$$

$$EVPD4: R = \exp[-1,3625(di\_sc/d\_sc)^{5,4292}];$$

$$EVPD5: R = 1 - 0,3079 di\_sc^{4,0312} / (d\_sc^{3,9842} hm^{-0,2858}).$$

O volume percentual sem casca pode ser obtido também a partir do diâmetro com casca através das seguintes equações que foram ajustadas para este efeito, assumindo que as equações seleccionadas para a estimação a partir do diâmetro *d* sem casca seriam, neste caso, também as melhores:

$$EVPD3: R = 1 - [1 - \exp(-0,8424 \tan(1,0472 hm^{0,0757} (di/d)))]^{3,9886};$$

$$QMR = 0,0049 \quad EM = 0,9380 \quad mPRESS = 0,0067 \quad maPRESS = 0,0648$$

$$EVPD4: R = \exp[-1,3858(di/d)^{5,5046}];$$

$$QMR = 0,0063 \quad EM = 0,9208 \quad mPRESS = 0,0056 \quad maPRESS = 0,0715$$

$$EVPD5: R = 1 - 0,3316 di^{4,0533} / (d^{4,0163} hm^{-0,2732}).$$

$$QMR = 0,0049 \quad EM = 0,9384 \quad mPRESS = 0,0069 \quad maPRESS = 0,0642$$

#### 4.3.3. Equações de perfil do tronco

Os modelos apresentados na secção 4.2.3., Quadro 4.5 foram ajustados ao conjunto de dados *I'* e validados com o conjunto de dados *2'*, de acordo com a metodologia descrita. Assim, primeiramente comparam-se os modelos com base na sua capacidade de ajustamento e predição aos dados amostra *I'*. Em segundo lugar as

comparações são baseadas na capacidade preditiva dos modelos para o conjunto de dados independente.

No Quadro 4.22 apresentam-se os valores das estatísticas de ajustamento e predição, atrás referidas, calculadas para o conjunto de dados de ajustamento das equações de perfil do tronco com casca, após ponderação pela função influência de Huber com  $r=2$ . Os modelos *EPT11* e *EPT13* não são apresentados uma vez que o reajustamento dos modelos sem o coeficiente  $\beta_3$ , não significativo em ambos os casos, não faz sentido. O modelo *EPT6* também não é apresentado por mostrar algumas falhas no cálculo do erro padrão assintótico dos coeficientes. A última coluna do Quadro 4.22 corresponde ao índice de ordenação final obtido através da soma dos índices de seriação parciais atribuídos a cada estatística para cada modelo. Ao menor valor obtido corresponde uma melhor performance do modelo relativamente aos restantes.

Quadro 4.22: Medidas de ajustamento e predição das equações de perfil do tronco sobre casca, após *IRWLS* (fase de ajustamento,  $n=4152$ ).

Modelo	QMR	EM	mPRESS	maPRESS	$R^2_{pred}$	P95	P5	NCOND	Ind. Ord.
EPT1	12,0031	0,9345	0,1984	2,7355	0,9291	6,5644	-5,2655	112,4044	9°
EPT2	11,9920	0,9342	0,1118	2,7140	0,9285	6,7448	-5,4013	1,0000	8°
EPT3	12,0115	0,9347	0,2302	2,7505	0,9296	6,5197	-5,1430	4,6970	10°
EPT4	11,7955	0,9356	0,1170	2,7511	0,9305	6,4314	-5,1186	2306,1001	6°
EPT5	11,8224	0,9356	0,1188	2,7454	0,9306	6,5093	-5,1170	6,3999	6°
EPT7	14,9854	0,9102	1,1167	2,9857	0,9158	8,5769	-5,1122	1,0000	12°
EPT8	9,0065	0,9522	-0,2728	2,3761	0,9470	4,7207	-5,4552	529177,4457	4°
EPT9	11,9058	0,9360	0,1845	2,7676	0,9319	6,1030	-5,3077	43,5864	6°
EPT10	8,1424	0,9569	0,0700	2,1887	0,9520	4,6166	-5,5956	6910,0106	2°
EPT12	8,1476	0,9569	0,0543	2,1815	0,9524	4,8544	-5,2814	609,3087	1°
EPT14	10,3038	0,9456	-0,0093	2,5739	0,9397	4,7709	-5,9190	3,7159	3°
EPT15	9,0899	0,9518	-0,2603	2,3104	0,9458	5,1776	-5,6014	315,7915	5°
EPT16	14,7695	0,9127	1,0001	2,9789	0,9186	8,3704	-5,2996	1951,9757	11°
EPT17	11,9418	0,9347	0,1134	2,7384	0,9291	6,4629	-5,3105	3,4716	7°

A aplicação dos índices descritos para a selecção dos modelos na fase de ajustamento com o conjunto de dados  $I'$  conduziu à seriação que a seguir se apresenta (por ordem decrescente, do melhor para o pior):

- *EPT12*, *EPT10*, *EPT14*, *EPT8*, *EPT15*, ***EPT5***, ***EPT4***, ***EPT9***, *EPT17*, *EPT2*, *EPT1*, *EPT3*, *EPT16*, *EPT7* (os modelos apresentados a negrito possuem o mesmo índice de ordenação).

Os modelos segmentados *EPT12*, de Cao *et al.* (1980) e *EPT10* de Max e Burkhart (1976), apresentam um melhor ajustamento e predição com o conjunto de dados 1', logo seguidos do modelo trigonométrico *EPT14* de Thomas e Parresol (1991). O modelo *EPT10* possui um número de condição de matriz superior a 1000 e, por isso, com maiores problemas de colinearidade relativamente aos outros dois.

Para melhor se avaliar a capacidade preditiva dos modelos procedeu-se à sua validação com o conjunto de dados 2', já referido. No Quadro 4.23 são apresentados os resultados da validação dos modelos com este conjunto de dados. Esta validação é baseada na comparação dos valores dos diâmetros *di* observados ao longo do tronco e estimados pelos modelos para um conjunto de dados independente.

Quadro 4.23: Medidas de predição resultantes do processo de validação para as equações de perfil do tronco com casca (fase de validação, n = 369).

Modelo	QM <sub>rp</sub>	R <sup>2</sup> <sub>rp</sub>	mrp	marp	V <sub>rp</sub>	Índ. Ordem
EPT1	11,4575	0,9462	1,3946	2,5733	9,5385	6°
EPT2	10,8690	0,9489	1,2859	2,4679	12,0129	5°
EPT3	11,6994	0,9450	1,4166	2,6263	9,7188	10°
EPT4	11,8202	0,9445	1,4178	2,5823	9,8367	12°
EPT5	11,7590	0,9448	1,3514	2,5932	9,9597	11°
EPT7	14,9641	0,9297	2,3027	2,6464	9,6882	14°
EPT8	8,3178	0,9609	0,9414	2,2177	7,4517	4°
EPT9	11,5745	0,9456	1,3102	2,6715	9,8846	9°
EPT10	7,2194	0,9661	1,2678	2,0046	5,6272	1°
EPT12	7,7185	0,9637	1,2558	2,0413	6,1583	2°
EPT14	41,6322	0,8044	0,4235	2,8417	41,5654	13°
EPT15	8,2002	0,9615	1,0716	2,0454	7,0710	3°
EPT16	14,3443	0,9326	2,2362	2,5983	9,3693	8°
EPT17	11,5409	0,9458	1,4355	2,5377	9,5060	7°

O processo de validação com o conjunto de dados independente 2' conduziu a uma ordenação dos modelos diferente do ajustamento. Assim, no processo de validação o modelo *EPT10* de Max e Burkhart (1976) troca de lugar com o modelo *EPT12* de Cao *et al.* (1980), assumindo o primeiro lugar, mas continuando bastante próximos. A maior surpresa reside no modelo *EPT14* de Thomas e Parresol (1991), classificado em terceiro lugar na fase de ajustamento passa para penúltimo na fase de validação. O modelo ajustou-se bem aos dados tendo-se obtido sinais e valores dos parâmetros semelhantes aos obtidos pelos autores. O valor do parâmetro *c* para a *Pinus elliottii* varia entre 1,4 e

1,5 enquanto para as folhosas (*Quercus phellos* e *Liquidambar styraciflua*) se situa entre 1,9 e 2,2 (Thomas e Parresol, 1991). Para o castanheiro o valor do parâmetro  $c$  situa-se dentro do intervalo de variação preconizado pelos autores para as folhosas, assumindo o valor de 2,1. Este modelo apesar de mais parcimonioso do que os modelos *EPT10* e *EPT12* ajusta-se mal à parte inferior do tronco, principalmente ao nível do cepo, com erros médios por excesso de 7,4 cm mas com valores extremos elevadíssimos, podendo obterem-se sobrestimas do diâmetro da base de 88 cm. O mau posicionamento na fase de validação deve-se a este facto.

O modelo *EPT15* de Bruce *et al.* (1969) assume agora o terceiro lugar logo seguido do modelo *EPT8* de Goulding e Murray (1976) que assume a mesma posição da fase de ajustamento. A quinta e a sexta posições são ocupadas pelos modelos *EPT1* e *EPT2* de Kozac *et al.* (1969).

Para melhor se observar o desempenho dos modelos na predição dos diâmetros ao longo do tronco foi efectuada a análise da média dos resíduos de predição e média do valor absoluto dos resíduos de predição por classes de altura a diferentes níveis do tronco  $hi$ . Embora esta análise tenha sido feita para a totalidade dos modelos apenas se apresenta para os cinco primeiros que demonstraram melhor comportamento na fase de validação (Quadro 4.24).

Quadro 4.24: Média dos resíduos e média do valor absoluto dos resíduos de predição para a estimativa dos diâmetros do tronco com casca a diferentes alturas  $hi$ .

Mod.	Classes de altura $hi$ (m)														
	$hi \leq 0,15$ (n=39)	2 (n=39)	4 (n=39)	6 (n=39)	8 (n=39)	10 (n=35)	12 (n=32)	14 (n=29)	16 (n=6)	18 (n=31)	20 (n=24)	22 (n=9)	24 (n=5)	26 (n=2)	28 (n=1)
EPT10	-0,89  2,50	0,29  0,39	0,47  1,01	1,16  1,47	1,23  1,68	1,53  2,01	1,89  2,33	2,11  3,02	2,47  3,00	2,82  3,20	2,63  2,97	2,21  2,78	2,55  2,55	1,78  1,78	2,58  2,58
EPT12	-1,01  2,67	-0,08  0,30	0,32  0,94	1,11  1,45	1,29  1,68	1,83  2,14	2,31  2,55	2,45  3,18	2,71  3,46	2,82  3,26	2,36  2,84	1,81  2,70	2,04  2,49	1,12  1,12	1,57  1,57
EPT15	-0,88  2,55	-0,47  0,47	0,47  0,98	1,51  1,80	1,57  1,97	2,26  2,43	2,25  2,58	1,92  2,85	1,86  4,43	1,73  2,72	1,14  2,24	0,59  2,54	0,59  2,63	-0,41  0,41	0,23  0,23
EPT8	0,54  2,65	-2,59  2,59	0,95  1,23	1,64  1,85	0,84  1,43	0,62  1,51	1,08  1,78	1,97  2,86	2,46  2,58	3,06  3,38	2,42  3,23	1,24  2,81	1,11  3,49	-0,86  0,86	-2,88  2,88
EPT1	4,44  4,61	-2,36  2,36	-1,27  1,68	0,28  1,25	1,07  1,64	1,80  2,16	2,43  2,69	2,62  3,29	2,91  3,29	3,07  3,41	2,67  3,05	2,15  2,80	2,41  2,52	1,53  1,53	2,10  2,10

Da análise do Quadro 4.24 verifica-se que os modelos polinomiais com três segmentos *EPT10* e *EPT12* se ajustam melhor à parte inferior do tronco devido à flexibilidade do sistema para descrever o perfil do tronco.

A aplicação destes modelos divide o tronco em três secções, ajustando-se a cada segmento um polinómio quadrático condicionado. A localização dos pontos de junção ( $u_i$ ) é feita de forma a permitir o melhor ajustamento do modelo. Os valores dos pontos de junção obtidos para o castanheiro com o modelo *EPT10* de Max e Burkhart são  $u_1=0,055$  e  $u_2=0,587$ , inferiores aos alcançados por Byrne e Reed (1986) para a *Pinus resinosa* e *Pinus taeda* após ajustamento das diferentes equações de volume e perfil do tronco em simultâneo, mas dentro da mesma ordem de grandeza e bastante diferentes dos obtidos por Cao *et al.* (1980) também para a *Pinus taeda* e Thomas e Parresol (1991) para folhosas, onde os valores dos parâmetros aparecem invertidos com o valor de  $u_1$  superior a  $u_2$ . Relativamente ao modelo *EPT12* de Cao *et al.* (1980) os pontos de junção assumem os valores  $u_1=0,524$  e  $u_2=0,939$  com a mesma ordem de grandeza dos valores obtidos pelos autores para a *Pinus taeda*.

O modelo *EPT15* de Bruce *et al.* (1968) ajusta-se melhor à parte superior do tronco acima dos 13 m de altura sendo o modelo menos enviesado e com menor variabilidade do erro para essa gama de alturas. Contudo como as equações de perfil do tronco são instrumentos muito úteis e flexíveis para a gestão florestal, uma vez que permitem estimar diâmetros superiores para qualquer altura do tronco e estimar o volume total ou mercantil para várias alturas e diâmetros de despona, considerou-se preferível optar por uma equação com melhor ajustamento para a parte inferior do tronco até aos 12 m de altura, por se tratar da parte mais valorizada do tronco para produção de madeira. Assim, uma vez que o modelo *EPT10* não é compatível e possui elevada colinearidade, optou-se pelo modelo *EPT12*, classificado em 2º lugar, com a vantagem de possuir um número de condição de matriz aceitável e de ser considerado compatível proporcionando boas estimativas quer do diâmetro quer do volume. A precisão na estimação dos diâmetros é aparentemente sacrificada para assegurar a compatibilidade da equação do perfil do tronco (Cao *et al.*, 1980). De seguida apresenta-se o modelo seleccionado:

$$EPT12: di=[(v/kh)(2z+1,0140(3z^2-2z)-2,0587(z-0,5236)^2I_1+407,6000(z-0,9387)^2I_2)]^{0,5}$$

$$\text{com } I_1=1, z \geq 0,5236 \text{ e } I_1=0, z < 0,5236;$$

$$I_2=1, z \geq 0,9387 \text{ e } I_2=0, z < 0,9387$$

#### 4.4. CONCLUSÕES

Neste capítulo obteve-se um conjunto de equações para avaliação do volume de madeira em povoamentos de alto fuste de castanheiro nas áreas de estudo (Trás-os-

Montes e Entre Douro e Minho). Os resultados obtidos permitem-nos sugerir por vezes a utilização de vários modelos conforme a explicação apresentada anteriormente. Seleccionaram-se modelos eventualmente com um desempenho ligeiramente inferior nos conjuntos de dados utilizados mas com uma colinearidade aceitável e, portanto, mais robustos e com maior capacidade de extrapolação. As equações finais obtidas foram as seguintes:

*Volume total com casca*

$$v = 0,015160 + 0,0000324 d^2 h \quad EM=0,9799$$

$$v = 0,00003299 d^2 h \quad EM=0,9877$$

*Volume comercial sem casca*

$$v_{m\_sc} = d\_sc^2 (0,2471 10^{-3} + 0,3251 10^{-4} hm) \quad EM=0,9860$$

$$v_{m\_sc} = d^2 (0,2230 10^{-3} + 0,2870 10^{-4} hm) \quad EM=0,9873$$

*Volume percentual com casca em função do diâmetro de despona di*

$$R = \exp[-1,4039(di/d)^{4,3716}] \quad EM=0,9571$$

*Volume percentual sem casca em função do diâmetro de despona di*

$$R_m = \exp[-1,3625(di\_sc/d\_sc)^{5,4292}] \quad EM=0,9118$$

$$R_m = \exp[-1,3858(di/d)^{5,5046}] \quad EM=0,9208$$

*Volume percentual com casca em função da altura de despona hi*

$$R = 1 - ((h-hi)/h)^{2,9340} \quad EM=0,9856$$

*Volume percentual sem casca em função da altura de despona hi*

$$R_m = 1 - [1 - \exp(-0,8031 \tan(1,5735 hm^{-0,0644}(hm-hi)/hm))]^{1,5762} \quad EM=0,9840$$

*Perfil do tronco com casca*

$$di = [(v/kh)(2z+1,0140(3z^2-2z)-2,0587(z-0,5236)^2 I_1 + 407,6000(z-0,9387)^2 I_2)]^{0,5}$$

$$\text{com } I_1=1, z \geq 0,5236 \text{ e } I_1=0, z < 0,5236 ;$$

$$I_2=1, z \geq 0,9387 \text{ e } I_2=0, z < 0,9387, z=(h-hi)/h \text{ e } k = \Pi/[4(100)^2] \quad EM=0,9569$$

$$v = 0,000052 (d^2 h)^{0,95710}$$

As equações de volume estimam o volume total  $v$  ( $m^3$ ) em função do diâmetro  $d$  com casca (cm) e da altura total  $h$  (m), ou ainda o volume comercial sem casca e sem cepo  $v_{m\_sc}$  igualmente em função do diâmetro  $d$  com casca ou sem casca  $d\_sc$  (cm) e da altura mercantil  $hm$  (m). Por sua vez as equações de volume percentual estimam a percentagem do volume total  $R$ , com casca e com cepo, em função do  $d$  e de um

diâmetro de despona com casca  $di$  (cm) ou  $h$  e altura de despona  $hi$  (m). A percentagem do volume comercial  $Rm$  sem casca e sem cepo é obtida em função de  $d$  e do diâmetro de despona com casca  $di$  (cm), ou sem casca  $di_{sc}$ , ou ainda da altura comercial  $hm$  e da altura de despona  $hi$  (m).

A equação de perfil do tronco estima diâmetros sobre casca (cm) ao longo do tronco em função da altura a que se encontram  $hi$  (m), da altura total  $h$  (m) e do volume total da árvore sobre casca  $v$  (m<sup>3</sup>).

Estas equações providenciam resultados compatíveis desde que estejam matematicamente relacionadas, devendo para isso serem ajustadas em simultâneo num sistema de equações de volume.

Segundo Byrne e Reed (1986) a predição do volume para qualquer limite mercantil pode ser conseguida de várias formas sendo duas delas as mais comuns. Uma, consiste na utilização de equações de volume percentual que predizem o volume mercantil como uma percentagem do volume total da árvore. A outra, baseia-se na aplicação de equações de perfil do tronco.

Como se sabe a predição do diâmetro a qualquer altura e, em muitos casos, a altura a um determinado diâmetro de despona, pode ser obtida através de uma equação do perfil do tronco. Além do mais, é possível, por vezes, derivar uma equação de volume percentual a partir de uma equação de perfil do tronco. O ideal é que estes sistemas de equações sejam compatíveis, *i. e.*, que os volumes estimados por integração da equação do perfil do tronco sejam idênticos aos volumes obtidos a partir das equações de volume total ou das equações de volume percentual. Porém, quando se desenvolvem equações de volume percentual do tronco, como é o caso deste trabalho, o interesse das equações do perfil do tronco é bastante restrito, limitando-se a sua utilização às situações em que existam restrições do tamanho do toro (por exemplo, madeira de classe superior com  $di > 25$  cm em toros com pelo menos 3 m). Esta razão, juntamente com o facto de se ter seleccionado mais do que uma equação em muitas das categorias, associada ao reduzido benefício que daí advém relativamente à dificuldade em obter convergência em sistemas de equações complexos como estes, levou a que não se procedesse, para já, ao ajustamento em simultâneo das equações seleccionadas nas diferentes categorias.

Recorde-se, contudo, que as equações de volume total obtidas são compatíveis com as respectivas equações de volume percentual.

## CAPÍTULO V

### ESTIMAÇÃO DA BIOMASSA E MINERALOMASSA AÉREA

#### 5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A biomassa<sup>1</sup> e relações de nutrientes estão na base dos estudos da dinâmica e funcionamento dos ecossistemas. O conhecimento do teor de elementos minerais nos diversos componentes das árvores é essencial para compreender o seu estado e fluxo na globalidade do sistema, bem como avaliar a sustentabilidade da estação. É também importante para uso comercial (combustível e fibra), assim como para o estudo científico da produtividade dos ecossistemas, fluxos de energia e para avaliar a contribuição das alterações nas florestas (especialmente tropicais) para o ciclo de carbono global (Parresol, 1999, 2002). Alguns modelos de balanço e fixação de CO<sub>2</sub> (e.g., Mákelá, 1997; Mohren, 1994) incluem a estimativa da biomassa ou uma função da biomassa como o volume, os seus componentes ou alguns parâmetros relacionados, para estabelecer os fluxos deste gás entre a vegetação, o solo e a atmosfera.

Segundo Schlegel (2002) actualmente cerca de 20 % das emissões de dióxido de carbono<sup>2</sup> (CO<sub>2</sub>) resultam da eliminação e degradação dos ecossistemas florestais. A redução da desflorestação e a reversão dos espaços anteriormente ocupados com floresta, através da reflorestação e gestão sustentável, conduzem de novo ao sequestro do CO<sub>2</sub>, diminuindo a concentração de gases de efeito de estufa na atmosfera e o aquecimento global. Portanto, a estimativa adequada da biomassa de uma floresta é um elemento de grande importância, uma vez que estas estimativas permitem determinar as quantidades de carbono e outros elementos químicos existentes em cada um dos seus componentes e representar a quantidade potencial de carbono que pode ser libertado para a atmosfera, ou conservada e fixada numa determinada área, quando as florestas são geridas para alcançar os compromissos de mitigação de gases de efeito de estufa (Brown *et al.*, 1996), como é o caso das florestas tropicais. Estudos relativamente recentes mostraram que as florestas localizadas em latitudes médias e elevadas do Hemisfério Norte funcionam também como importantes sumidouros de carbono (Fang *et al.*, 2001). Assim, as equações de predição da biomassa e mineralomassa nas regiões

---

<sup>1</sup> A biomassa lenhosa é representada pela quantidade, expressa em massa, de matéria viva das árvores (Rondeux, 1993).

<sup>2</sup> O CO<sub>2</sub> é um dos principais gases do efeito de estufa que são considerados como uma das causas da mudança climática global.

temperadas são uma ferramenta importante para a quantificação do carbono libertado, por exemplo, por acção dos incêndios que ocorrem sobretudo nas regiões do Sul da Europa, bem como para avaliar o efeito de outras perturbações no equilíbrio dos ecossistemas. Estas equações podem ser igualmente utilizadas para prever o crescimento de povoamentos jovens (Wagner e Ter-Mikaelian, 1999) e serem parte integrante de modelos de produção, para modelar o crescimento ao nível da árvore e do povoamento (Korzukhin *et al.*, 1996) com vista à análise da produtividade a longo prazo e da sustentabilidade da estação. No entanto, convém ressaltar que os modelos de produção empíricos, ao tratarem o clima e o ambiente como estático, limitam severamente a sua utilidade na análise da sustentabilidade (Monserud, 2003). Segundo este autor a grande vantagem dos modelos de produção é a representação detalhada da dinâmica das árvores e dos povoamentos, incluindo a mortalidade. Estas equações são igualmente importantes para desenvolver indicadores da produtividade florestal (Baskerville, 1965), quantificar padrões da sucessão florestal (Whittaker *et al.*, 1974) e estimar o carbono potencial sequestrado nos povoamentos (Reed *et al.*, 1995).

As equações de biomassa, da mesma forma que as equações de volume ou altura-diâmetro, podem ser desenvolvidas para um determinado local ou para uma região, por espécie ou grupos de espécies, por zona climática ou por grandes grupos botânicos (*p. e.* folhosas e coníferas) (Schroeder *et al.*, 1997). A informação acerca da biomassa das árvores individuais pode ser aplicada a inventários de biomassa a grande escala e a uma grande variedade de problemas ecológicos e florestais, permitindo relacionar, por exemplo, a quantidade de combustível com as condições de propagação de incêndios, avaliar os resíduos resultantes das actividades florestais quer em termos económicos quer em termos de contributo ou perda para o ecossistema.

Apesar das equações alométricas serem largamente utilizadas para estimar a biomassa florestal existe muito pouca informação especificamente para o castanheiro, salientando-se concretamente os trabalhos de Gallego *et al.* (1994) e Leonardi *et al.* (1996a) para povoamentos de talhadia. Dos estudos de biomassa e nutrientes para o castanheiro, relativos a alguns dos seus componentes, particularmente a folhada, destacam-se os trabalhos de Ranger *et al.* (1990), Leonardi *et al.* (1996b), Martin *et al.* (1996), Regina (2000), Regina *et al.* (2001) e Martins *et al.* (1999) para povoamentos de talhadia e Pires *et al.* (1999) para os soutos.

Assim, dada a importância das relações de biomassa e nutrientes para a dinâmica e funcionamento sustentável dos ecossistemas do castanheiro, é nosso objectivo

desenvolver equações de predição que demonstrem a relação entre a biomassa da árvore e variáveis dendrométricas assim como a distribuição da biomassa pelos componentes da árvore (lenho, casca, ramos, folhas e flores) e os principais elementos minerais neles contidos.

### **5.1.1. Métodos de avaliação da biomassa**

A biomassa pode ser estimada através de diversos métodos<sup>1</sup>. Os métodos mais utilizados em termos florestais são sobretudo os métodos baseados no corte das árvores com a avaliação directa das suas dimensões e pesos total e ou por componentes, expressos em matéria seca. O recurso a equações matemáticas ajustadas por regressão para a sua estimação é contudo o método mais utilizado na prática em inventários florestais, visto não exigirem o abate das árvores. Assim, os métodos mais comumente utilizados incluem-se numa das seguintes categorias:

- Método da colheita total;
- Métodos baseados em árvores modelo;
- Métodos baseados em equações alométricas.

No “método da colheita” o abate realiza-se sobre parcelas inteiras, que podem ter uma área considerável. A colheita e pesagem total da biomassa de parcelas inteiras é uma técnica potencialmente muito rigorosa, mas uma grande parte da sua precisão depende dos métodos adoptados para generalizar ao povoamento os resultados obtidos em parcelas de dimensão e em número limitados (Fabião, 1986). Essa generalização apoia-se frequentemente na aplicação complementar das equações alométricas.

No “método das árvores modelo” são abatidas árvores representativas das classes de diâmetro presentes no povoamento. Nesta categoria poderemos incluir também o “método da árvore média” que consiste no abate da árvore, ou árvores, com diâmetro à altura do peito próximo do diâmetro quadrático médio. Destina-se sobretudo a povoamentos regulares pois só neste caso a árvore média se pode considerar como representativa da média do povoamento. Este método pode proporcionar grandes enviesamentos da biomassa do coberto (Sato, 1982).

O “método das equações alométricas” tem sido considerado o “método florestal” por excelência, por melhor se harmonizar com as técnicas clássicas de avaliação do volume do tronco (Fabião, 1986). Baseia-se no estabelecimento de relações alométricas

---

<sup>1</sup> Serão mencionados apenas os métodos mais comumente utilizados pelos florestais.

que relacionam o peso seco com características das árvores representativas do povoamento, como o diâmetro a 1,30 m e a altura total. As técnicas de regressão são o método mais largamente utilizado para estimar a biomassa dos povoamentos (Art e Marks, 1971; Satoo, 1982; Parresol, 2002).

É frequente também o recurso, principalmente quando se pretende estimar a biomassa em grande escala, à estimação da biomassa durante os inventários com aplicação de equações alométricas, à conversão do volume em peso com a utilização de um valor médio da densidade do lenho e ainda à integração de funções. Este último processo resulta da integração de equações que descrevam o perfil do tronco e de funções de densidade de lenho, para a obtenção de estimativas do peso total ou parcial do tronco.

Todos estes métodos de estimação da biomassa de povoamentos envolvem, pelo menos de início, a determinação da biomassa individual por componentes, em árvores abatidas, com vista à obtenção de equações de regressão que relacionem a biomassa em função de variáveis dendrométricas das árvores. A predição da biomassa de um povoamento resulta assim do somatório das estimativas da biomassa das árvores consideradas individualmente.

A estimativa do peso da vegetação é um processo dispendioso e demorado pelos meios que envolve, daí que tenham sido desenvolvidos numerosos métodos e processos alternativos indirectos, sem a necessidade de recorrer à análise destrutiva. O recurso à modelação dinâmica do coberto vegetal pode ser uma boa alternativa aos métodos estáticos existentes (Houghton *et al.*, 2001). Baseia-se em modelos de ecossistema que simulam a perda de biomassa a seguir a uma alteração e a sua acumulação durante o processo de restauração do mesmo. Estes modelos, contudo, não são fáceis de desenvolver devido à complexidade que envolvem.

Têm vindo a ser experimentados, embora aparentemente com pouco sucesso, métodos não destrutivos de estimação da biomassa acima do solo com base na tecnologia de satélite sensível à estrutura vertical do coberto vegetal. A utilização de dados ópticos e de microondas (radar), por exemplo, não têm produzido resultados consistentes em florestas com biomassa moderada e elevada (Waring *et al.*, 1995; Rignot *et al.*, 1997; Nelson *et al.*, 2000).

Tendo em conta o Protocolo de Kyoto e a necessidade eminente de determinar as fontes<sup>1</sup> e os sumidouros de carbono resultantes das mudanças no uso da terra (e, talvez, dos processos naturais), são imprescindíveis métodos precisos, rápidos e económicos de determinação da biomassa (Houghton *et al.*, 2001). Quando estiverem disponíveis, estes métodos poderão ser usados como rotina por todos os países sem as discrepâncias que actualmente se verificam na estimação dos valores da biomassa.

## 5.2. MATERIAL E MÉTODOS

Para o estudo da biomassa os dados utilizados baseiam-se em informação recolhida na análise destrutiva de 34 árvores abatidas, distribuídas pelas classes de diâmetro existentes nos povoamentos adultos de alto fuste de castanheiro localizados no Marão, Padrela (povoamento C) e Bornes. Assim, na Padrela foram seleccionadas aleatoriamente para abate 18 árvores distribuídas pelas classes de diâmetro, tendo em conta a sua frequência (nas classes de maior frequência, 25 a 50 cm, foram abatidas duas árvores por classe). Nos povoamentos do Marão e Bornes, com menor dimensão, foi abatida apenas uma árvore por classe de diâmetro (Quadro 5.1). O abate teve lugar em pleno período vegetativo, quando as folhas apresentavam já a sua dimensão máxima (na Padrela o abate teve início na última semana de Junho de 2001 e prolongou-se pelo mês de Julho, seguido do Marão e Bornes, com o abate já no mês de Agosto do mesmo ano).

Quadro 5.1: Distribuição das árvores abatidas por classe de diâmetro e local.

Nº árv. abatid.		Classes diâmetro											
		10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Padrela	18	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1
Marão	9		1	1	1	1	1	1	1	1	1		
Bornes	7	1	1	1	1	1	1	1					

Nas classes mais elevadas (superiores a 50 cm) correspondentes às árvores mais valiosas não foi possível abater mais do que uma árvore devido não só ao seu elevado valor económico (125 € o metro cúbico) mas também à falta de indivíduos representativos dessas classes. Nas classes inferiores a 25 a dificuldade encontrada

<sup>1</sup> “sources” e “sinks”, no original.

preendeu-se com o facto da maioria dos indivíduos destas classes, principalmente na Padrela, não formarem pés individualizados, admitindo-se serem provenientes de cortes (talhadia) ou resposta ao fogo que em tempos percorreu o povoamento.

### 5.2.1. Medição das árvores seleccionadas para abate

As árvores seleccionadas para abate foram sujeitas previamente às mesmas medições do restante povoamento. Antes do abate marcou-se a direcção norte na casca da árvore com um traço vertical de tinta, bem como o nível do diâmetro à altura do peito. O abate das árvores foi feito o mais baixo possível, dada a inclinação do terreno. Após o abate traçou-se também a marcação da direcção Norte com tinta ao longo do tronco, e mediu-se o comprimento total da árvore e de início da copa viva, correspondente ao primeiro ramo vivo (neste caso com diâmetro superior a 2,5 cm) considerado significativo (Liu e Burkhart, 1993). Antes da desrama da árvore dividiu-se a copa viva em três estratos: superior, médio e inferior. Após a separação do tronco principal estes ramos com folhas foram colocados em três grupos distintos, de acordo com o respectivo estrato, com vista à separação das folhas. De seguida, procedeu-se à toragem das árvores com o primeiro corte ao nível do diâmetro a 1,30 m. A partir deste nível as árvores foram toradas de 2,25 em 2,25 m até à definição da bicada (diâmetro de 7 cm). Na base de cada toro, incluindo o cepo, foram retiradas 2 rodela com  $\cong 5$  cm de espessura cada, uma utilizada para o método de análise do tronco (descrito no Capítulo II) e a outra para determinação da biomassa<sup>1</sup>. Depois do seccionamento foram medidos:

- Os diâmetros com e sem casca a 1,30 m ( $d$ ) (diâmetro cruzado segundo a direcção N-S, E-W, com régua);
- Os diâmetros com e sem casca na base da copa ( $d_{bc}$ );
- O diâmetro de despona (7 cm) ( $d_{desp}$ );
- O comprimento da bicada ( $d < 7$  cm) ( $h_{bicada}$ );
- A altura mercantil ( $h_{merc}$ );
- A espessura da casca segundo as direcções N-S e E-W.

A determinação directa da biomassa foi efectuada através da pesagem em fresco dos seguintes componentes da árvore *in loco*:

Toros 1 a  $n$  ( $P_1, \dots, P_n$ ) com casca;

---

<sup>1</sup> A metodologia de recolha de dados nas árvores abatidas para o método de análise do tronco foi descrita no Capítulo II, pelo que se descrevem apenas as medições comuns necessárias também para este ponto, embora a metodologia de campo fosse aplicada em simultâneo.

Rodelas *l* a *n*, com casca.

Casca das rodelas *l* a *n*. Estes valores foram usados no cálculo da percentagem de peso de casca e lenho das rodelas. O cálculo das percentagens de lenho e de casca, em fresco e em cada rodela foi obtido da seguinte forma:

$$Casca (\%) = \frac{PesoCasca}{PesoLenho + Casca} \times 100;$$

$$Lenho (\%) = \frac{PesoLenho}{PesoLenho + Casca} \times 100;$$

- Bicada (B<sub>1</sub>) diâmetro > 3 cm;
- Bicada (B<sub>2</sub>) diâmetro ≤ 3 cm;
- Folhas por estrato (correspondente à divisão da copa em três estratos: superior, médio e inferior);
- Flores;
- Ramos mortos;
- Ramos vivos por categorias divididos por calibres com auxílio de uma craveira:

- categoria 1,  $d \leq 1$  cm (R>0i);
- categoria 2,  $1 < d \leq 3$  cm (R1i);
- categoria 3,  $3 < d \leq 5$  cm (R3i)
- categoria 4,  $5 < d \leq 7$  cm (R5i)
- categoria 5,  $d > 7$ cm (R7i)

Os ramos, na sua totalidade, foram pesados no campo por categorias.

Foram retiradas amostra aleatórias com 1 kg, aproximadamente, de cada categoria. As amostras foram pesadas no campo com uma balança com uma precisão de 1 g, guardadas em sacos herméticos de polietileno devidamente identificados e tarados, e acondicionadas em arcas térmicas portáteis.

As folhas foram também pesadas na sua totalidade no campo.

### **5.2.2. Tratamento das amostras em laboratório**

Uma vez no laboratório as amostras foram de novo pesadas, desta vez com uma balança de precisão à décima do grama, para que a pesagem da amostra fosse feita, quer em húmido quer em seco, com a mesma balança. Após a pesagem do peso fresco as amostras das folhas, flores e cascas foram secas em estufa a  $70 \pm 2$  °C (da mesma forma que Bartos e Johnston, 1978; Wang e Klinka, 1997; Elliott *et al.*, 2002; Hart *et*

al., 2003; Ritson e Sochacki, 2003; Wagner e Ter-Mikaelian, 1999) enquanto as amostras de lenho e ramos foram secas a  $103 \pm 2$  °C (Fabião, 1986; Pardé e Bouchon, 1988; Loguercio e Defossé, 2001), até peso constante.

Para a determinação dos nutrientes foram moídas num moinho de martelos as amostras das folhas, flores e cascas, enquanto as amostras de lenho e ramos tiveram de ser transformadas em pequenas lascas de madeira antes de poderem ser moídas num moinho de lâminas.

Após a conversão das amostras em pó estas foram etiquetadas e enviadas para o Laboratório para análise dos nutrientes *N*, *P*, *K*, *Ca*, *Mg*, *S*, *B* e *C*. Os elementos *N*, *P* e *K* foram obtidos por digestão sulfúrica, o *Ca*, *Mg* e *S* por digestão nítrico-perclórica, o *B*, via seca por incineração. As determinações analíticas de *N*, *P* e *B* no extracto foram determinadas por espectrofotometria de absorção molecular, a determinação de *K* por espectrofotometria por emissão de chama, a determinação de *Ca* e *Mg* por espectrofotometria de absorção molecular e a determinação de *S* por turbidimetria. O carbono foi obtido em analisador elementar por incineração a 1100 °C e determinação do *CO*<sub>2</sub> em NIRD (*near infrared detector*).

Para a análise dos elementos minerais do lenho do tronco principal e respectiva casca foram consideradas somente cinco amostras correspondentes a cinco níveis por árvore, incluindo obrigatoriamente os níveis do cepo e 1,30 m em todas as árvores. Os restantes três níveis considerados correspondem à proximidade da base da copa, meio e parte superior da mesma. As cascas analisadas correspondem, para a mesma árvore, aos mesmos níveis considerados para o lenho. Assim, para a biomassa do lenho e casca o teor de elementos minerais destes componentes é calculado com base na média ponderada das amostras correspondentes a estes níveis. Na ponderação considerou-se a soma da concentração de cada elemento multiplicada pela biomassa da respectiva amostra, sobre a biomassa total das cinco amostras de lenho ou casca, retiradas em cada uma das árvores abatidas.

No que diz respeito às folhas foi efectuada a sua análise para cada estrato considerado. Os ramos foram analisados por categorias.

Para o lenho e casca determinaram-se as respectivas percentagens em verde com base nas rodela amostra retiradas em cada uma das secções de corte consideradas. Assim, para cada toro foi determinada uma média ponderada do tipo  $((P_1 \%C_1 + P_2 \%C_2)/(P_1 + P_2))$  para obtenção da casca média, em que *P* representa o peso total das rodela e *C* a casca e os sub índices 1 e 2 as rodela amostra do extremo inferior e

superior do toro, respectivamente. Para o lenho usou-se uma ponderação semelhante,  $((P_1 \%L_1 + P_2 \%L_2)/(P_1 + P_2))$ , em que  $L$  representa o lenho. A percentagem de lenho e casca de cada toro foi calculada com base nos respectivas médias ponderadas assim obtidas. As percentagens assim obtidas foram multiplicadas pelo peso total do respectivo toro para obtenção da quantidade de casca ou lenho, respectivamente. Uma ponderação semelhante foi usada para a determinação da biomassa em cada toro, usando para isso o peso seco do lenho e casca das rodela amostra dos extremos do respectivo toro.

### 5.2.3. Caracterização dos dados finais

A metodologia descrita anteriormente conduziu ao conjunto de dados utilizados na modelação da biomassa<sup>1</sup> em função de variáveis dendrométricas da árvore individual cuja caracterização é apresentada no Quadro 5.2 e à determinação do teor de elementos minerais por componente da biomassa, utilizados na modelação da mineralomassa igualmente em função de variáveis dendrométricas.

Quadro 5.2: Caracterização do conjunto de dados utilizados na modelação da biomassa (W) em função de variáveis dendrométricas das 34 árvores abatidas.

Componente	Biomassa aérea (kg) (n=34)			
	Mín.	Média	Max.	s
W_Lenho	21,10	472,22	1416,15	381,01
W_Casc	4,83	48,81	134,08	34,79
W_Flor	0,05	2,02	13,83	3,08
W_Folh	0,85	10,45	43,41	8,80
W_R:				
W_Rviv	3,91	153,05	735,97	190,66
W_Rmort	0,43	49,60	725,79	131,07
W_Rtot	3,91	198,27	1461,83	287,19
W_Tot	34,87	731,64	2658,83	648,62
Variáveis dendrométricas (n=34)				
Variável	Mín.	Média	Max.	s
d (cm)	10,25	33,98	64,20	14,14
h (m)	11,55	21,91	30,40	4,63
d_bc (cm)	8,55	26,81	62,00	13,18
h_bc (m)	2,19	9,28	19,36	5,30

W\_Lenho, biomassa do tronco sem casca; W\_Casc, biomassa da casca; W\_Flor, biomassa das flores; W\_Rviv, biomassa dos ramos vivos; W\_Rmort, biomassa dos ramos mortos; W\_Rtot, biomassa dos ramos vivos e mortos; W\_Tot, biomassa total; d\_bc, é o diâmetro na base da copa viva; h\_bc, é a altura do início da copa viva.

<sup>1</sup> Evitaremos utilizar o termo “peso” que não é muito apropriado uma vez que este diz respeito, para um determinado corpo, à força de atracção exercida pela terra sobre esse mesmo corpo. A noção de “massa”, quer dizer de quantidade de matéria, é mais adequada (Rondeux, 1993).

No Quadro 5.3 são apresentados os valores médios e respectivos desvios padrões, das concentrações dos elementos minerais analisados nos diferentes compartimentos da biomassa: *N, P, K, Ca, Mg, S, B* e *C*.

Quadro 5.3: Valores médios e respectivos desvios padrões (valor apresentado entre parêntesis), da concentração de elementos minerais por componentes e subcomponentes da biomassa considerados.

Comp.	Concentração dos elementos minerais em (g kg <sup>-1</sup> ) de biomassa							
	N	P	K	Ca	Mg	S	B*	C
Casca:								
C_tr	4,18 (0,72)	0,37 (0,13)	1,72 (0,71)	13,16 (5,22)	1,58 (0,86)	1,17 (0,07)	9,80 (3,45)	530,08 (36,27)
Folhas:								
F_1/3	20,37 (2,82)	1,53 (0,67)	6,28 (1,51)	3,21 (1,15)	3,31 (0,98)	0,87 (0,27)	11,17 (3,63)	508,01 (29,15)
F_2/3	21,77 (2,90)	1,62 (0,29)	7,03 (2,29)	3,80 (1,41)	4,08 (1,75)	1,00 (0,25)	11,87 (3,76)	507,68 (27,04)
F_3/3	21,94 (3,01)	1,73 (0,25)	8,76 (2,07)	3,84 (1,29)	3,86 (0,86)	1,00 (0,19)	13,71 (3,74)	501,28 (27,71)
F_t	21,14 (2,74)	1,59 (0,36)	7,09 (1,75)	3,52 (1,19)	3,68 (0,94)	0,94 (0,16)	12,01 (3,65)	506,51 (25,71)
Flores	11,53 (3,19)	1,25 (0,28)	7,31 (1,95)	2,62 (0,86)	2,91 (1,48)	0,45 (0,24)	10,57 (5,74)	517,61 (37,59)
F_tot (Folh.+Flo.)	20,18 (2,81)	1,55 (0,33)	7,15 (1,75)	3,40 (1,14)	3,57 (0,92)	0,89 (0,17)	12,02 (3,63)	506,96 (23,69)
Ramos:								
R>0i	5,92 (1,17)	0,78 (0,29)	4,22 (1,68)	5,17 (3,18)	1,96 (1,13)	0,19 (0,08)	10,71 (3,08)	520,96 (35,18)
R1i	3,35 (0,58)	0,44 (0,20)	2,09 (1,07)	3,96 (3,01)	1,12 (0,52)	0,12 (0,06)	7,44 (2,22)	486,87 (37,76)
R3i	2,31 (0,51)	0,29 (0,12)	1,09 (0,57)	2,83 (1,15)	0,86 (0,40)	0,11 (0,07)	6,02 (2,24)	469,03 (38,44)
R5i	1,80 (0,29)	0,38 (0,85)	1,02 (1,62)	2,49 (1,15)	0,67 (0,49)	0,11 (0,08)	4,41 (2,79)	480,06 (36,65)
R7i	1,71 (0,35)	0,19 (0,09)	0,57 (0,31)	2,34 (0,97)	0,62 (0,43)	0,13 (0,14)	3,46 (2,80)	475,58 (35,22)
R_viv	2,84 (0,69)	0,39 (0,21)	1,61 (0,79)	3,22 (1,55)	1,03 (0,58)	0,12 (0,07)	6,96 (2,36)	483,42 (26,38)
R_mort	2,70 (0,90)	0,22 (0,12)	0,41 (0,23)	3,76 (1,86)	0,84 (0,48)	0,13 (0,08)	5,04 (2,64)	481,10 (39,87)
R_tot	2,79 (0,69)	0,36 (0,17)	1,45 (0,81)	3,24 (1,56)	0,99 (0,15)	0,12 (0,07)	6,72 (2,29)	484,33 (25,23)
Lenho:								
Tr_sc	1,07 (0,71)	0,12 (0,09)	0,31 (0,43)	0,55 (0,29)	0,23 (0,11)	0,12 (0,14)	2,28 (1,35)	483,95 (50,61)

\*Em (mg kg<sup>-1</sup>); C\_tr, calculado com base na média ponderada da concentração de nutrientes da casca em cinco níveis do tronco por árvore; F1/3, F2/3 e F3/3, concentração de nutrientes das folhas superiores, médias e inferiores, respectivamente; F\_t, média ponderada da concentração de nutrientes das folhas dos 3 estratos; F\_tot, média ponderada folhas e flores; R\_viv, R\_mort e R\_tot, média ponderada da concentração de nutrientes do conjunto dos ramos vivos, ramos mortos e da totalidade dos ramos vivos e mortos, respectivamente; Tr\_sc, média ponderada da concentração de nutrientes do lenho do tronco sem casca.

A concentração de cada elemento mineral obtido na amostra, ou na média das amostras de cada indivíduo, dependendo dos componentes, foi multiplicada pela

respectiva biomassa, para permitir avaliar os teores de elementos minerais nos diferentes compartimentos de uma mesma árvore. A caracterização dos dados assim obtidos, relativos às 34 árvores abatidas, encontra-se no Quadro 5.4. Estes dados foram utilizados na modelação da mineralomassa em função de variáveis dendrométricas da árvore individual.

Quadro 5.4: Valor médio e respectivo desvio padrão (entre parêntesis) da mineralomassa, para cada um dos elementos minerais considerados.

Elemento químico	W_Lenho (kg)	W_Casca (kg)	W_Ram. Viv. (kg)	W_Folhas (kg)	W_Flores (kg)	W_Total* (kg)
N	0,489 (0,572)	0,203 (0,155)	0,379 (0,476)	0,225 (0,199)	0,020 (0,033)	1,451 (1,489)
P	0,047 (0,062)	0,017 (0,015)	0,048 (0,062)	0,015 (0,011)	0,002 (0,003)	0,140 (0,151)
K	0,105 (0,161)	0,085 (0,085)	0,201 (0,205)	0,074 (0,065)	0,014 (0,024)	0,500 (0,427)
Ca	0,307 (0,414)	0,594 (0,436)	0,394 (0,389)	0,036 (0,028)	0,004 (0,006)	1,448 (1,143)
Mg	0,107 (0,114)	0,065 (0,047)	0,129 (0,166)	0,037 (0,030)	0,005 (0,007)	0,379 (0,379)
S	0,059 (0,081)	0,008 (0,008)	0,016 (0,019)	0,010 (0,008)	0,001 (0,001)	0,097 (0,106)
B**	0,977 (1,966)	0,461 (0,360)	0,904 (1,084)	0,116 (0,100)	0,020 (0,032)	2,703 (2,623)
C	226,714 (179,350)	26,034 (18,832)	73,731 (92,717)	5,289 (4,446)	0,893 (1,437)	354,902 (310,320)

\* inclui os ramos mortos; \*\* quantidades em grama (g). W = Biomassa.

## 5.2.4. Modelos testados e organização dos dados

### 5.2.4.1. Equações de biomassa

Para a modelação da biomassa por componentes foram testadas as funções que a seguir se apresentam, as quais são vulgarmente utilizadas na modelação do volume da árvore:

$$(1) y = \beta_1 d^2 h$$

$$(2) y = \beta_1 (d^2 h)^{\beta_2}$$

$$(3) y = d^2 / (\beta_1 + \beta_2 h^{-1})$$

$$(4) y = \beta_0 + \beta_1 d^{\beta_2} h^{\beta_3}$$

$$(5) y = \beta_1 d^{\beta_2} h^{\beta_3}$$

$$(6) y = \beta_1 d^{\beta_2}$$

$$(7) y = \beta_1 d^{\beta_2} e^{(\beta_3 d)}$$

$$(8) y = \beta_0 + \beta_1 d^2 h$$

$$(9) y = d^{(\beta_0 + \beta_1 d^{\beta_2})}$$

Numa primeira fase as funções foram testadas para cada um dos componentes considerados, em função das variáveis dendrométricas da árvore. Devido à baixa eficiência de modelação conseguida na modelação da biomassa de algumas das componentes inicialmente consideradas, procedeu-se ao agrupamento dos pesos secos de algumas componentes avaliadas em separado durante a fase de recolha de dados, desde que essas componentes não fossem consideradas importantes para o objectivo deste trabalho. Assim, foram agrupadas para efeito da predição da biomassa por componentes, a biomassa das flores e da totalidade das folhas numa única categoria designada por  $W\_Ftot$ . Por sua vez as diferentes categorias de biomassa de ramos vivos foram reunidas numa única categoria designada por  $W\_Rviv$ . Para além destas duas classes foram consideradas ainda as seguintes categorias para análise: biomassa da casca ( $W\_Casc$ ); biomassa do tronco principal sob casca ( $W\_Lenho$ ), biomassa do tronco principal sobre casca ( $W\_Tronc$ ) e a biomassa aérea total ( $W\_Tot$ ).

#### 5.2.4.2. Equações de mineralomassa

Para a modelação da mineralomassa por componentes foram testadas as funções não lineares (2 - 7), apresentadas no ponto anterior, cujos parâmetros não se mostraram significativos na maioria dos casos. Por esta razão foram testadas as funções lineares normalmente utilizadas para a modelação do volume (algumas destas funções foram testadas também para a biomassa):

$$(EMI) y = \beta_0 + \beta_1 d^2 h$$

$$(EM 1.1) y = \beta_1 d^2 h$$

$$(EM 2) y = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2$$

$$(EM 2.1) y = \beta_1 d + \beta_2 d^2$$

$$(EM 3) y = \beta_1 d^2$$

$$(EM 4) y = \beta_1 d + \beta_2 h$$

As funções foram testadas para os mesmos compartimentos considerados para a biomassa e especificados no ponto anterior.

#### 5.2.5. Critérios utilizados no ajustamento e selecção dos modelos

O processo de ajustamento das funções de biomassa por componentes foi efectuado inicialmente com base no método dos mínimos quadrados lineares ou não

lineares ordinários<sup>1</sup>. Para tal, recorreu-se ao procedimento *PROC REG* para as equações lineares e, *PROC NLIN* para as equações não lineares, do programa *SAS/STAT* com o método iterativo de minimização de Gauss-Newton, no último caso.

A verificação dos pressupostos da regressão revelou um afastamento da normalidade e heterocedasticidade dos resíduos studentizados. A não homogeneidade da variância dos resíduos é uma característica típica dos dados da biomassa referida por diversos autores. Por esta razão foi utilizada a regressão linear e não linear ponderada iterativamente (*IRWLS*) com recurso à função de Huber com um valor limite de  $r=1$ .

Os gráficos de resíduos studentizados vs. valores estimados demonstraram um padrão mais ou menos evidente de variação crescente com o aumento dos valores da biomassa por componente. Para corrigir este efeito foram utilizados factores de ponderação iguais ao inverso das variáveis independentes com diferentes expoentes<sup>2</sup>, os quais foram alcançados por análise dos gráficos dos resíduos obtidos com vários pesos alternativos:

- para a biomassa da casca  $1/d^2$ ;
- para a biomassa das folhas e flores  $1/(d^{0.4} h^{0.5})$ ;
- para a biomassa dos ramos  $1/(d^{0.8} h^{1.4})$ ;
- para a biomassa do tronco sob e sobre casca  $1/(d^{0.8} h^{0.4})$ ;
- para a biomassa total  $1/(d^2 h)$ .

A avaliação da qualidade do ajustamento com vista à selecção dos melhores modelos foi efectuada com base na eficiência de modelação (*EM*), no quadrado médio dos erros ponderados do modelo (*QMR*) e na significância dos parâmetros através da análise dos intervalos assintóticos de confiança ou do teste de *t* de significância dos parâmetros, para os modelos lineares. No que se refere à capacidade preditiva e enviesamento dos modelos foi considerado: o  $R^2$  de predição ( $R^2_{pred}$ ), a média dos resíduos *PRESS* (*mPRESS*) e média do valor absoluto dos resíduos *PRESS* (*maPRESS*) bem como os valores dos percentis 95 % (*P95*) e 5 % (*P5*). Para detecção da heterocedasticidade e avaliação da normalidade dos erros foram usados os gráficos dos resíduos studentizados em função da biomassa estimada e de detecção de normalidade com base nos gráficos em papel de probabilidades normal “QQ plot” igualmente dos

---

<sup>1</sup> Ordinary least squares (OLS), no original.

<sup>2</sup> As variáveis *d* e *h* mudam de acordo com as variáveis independentes usadas pelo respectivo modelo, mantendo-se os coeficientes.

resíduos studentizados. A maior parte dos modelos foram eliminados à partida por originarem parâmetros não significativamente diferentes de zero.

Uma característica desejável dos modelos de estimação da biomassa por componentes é que a soma das predições parciais iguale a predição obtida a partir da equação da biomassa total (Parresol, 2001). A propriedade da aditividade entre componentes da biomassa e biomassa total da árvore pode ser aplicada essencialmente de duas formas (se admitirmos, como é normal, que existe correlação entre os diferentes componentes). A primeira consiste na estimação da biomassa total com base na soma das estimativas das biomassas parciais, dadas pelas melhores regressões independentes, obtidas para cada um dos diferentes componentes constituintes da árvore. A segunda forma consiste no ajustamento simultâneo das equações dos diferentes componentes da biomassa, com correlação contemporânea, pelo método das regressões aparentemente não relacionadas “*seemingly unrelated regressions*” (*SUR*). Este é o método mais geral e flexível, mas também o mais difícil de empregar (Parresol, 1999). Por este processo obtém-se um modelo para a biomassa total formado pela combinação dos submodelos dos diferentes componentes para que se possa garantir a sua aditividade, ou seja, se um componente da biomassa de uma árvore fizer parte de outro componente, é lógico esperar que a estimativa da parte não exceda a predição do todo. Portanto, se um componente for definido como a soma de dois subcomponentes, a estimativa desse componente obtida por regressão deve igualar a soma das estimativas das equações dos dois subcomponentes (Parresol, 2001). A aditividade é uma característica importante das equações de predição de biomassa na medida em que estas podem ser utilizadas em numerosos estudos como a produtividade dos ecossistemas e fluxos de energia e de elementos minerais que muitas vezes consideram a biomassa dos componentes em detrimento da biomassa total. Também a análise económica depende de produtos que possam ser agregados e desagregados com consistência sem discrepâncias entre os componentes e o seu total (Parresol, 2001).

Assim, para garantir a aditividade dos componentes da biomassa recorreu-se ao ajustamento simultâneo com base no método *SUR*. Este método foi aplicado recorrendo à opção *ITSUR* do procedimento *PROC MODEL* (SAS Institute, 1999-2001). Para tal, os quatro melhores modelos para os componentes de biomassa da casca, dos ramos vivos, das folhas mais flores e do lenho sob casca, seleccionados com base nos critérios referidos, e a biomassa total, dada pela soma das funções das componentes anteriores, foram reajustados simultaneamente com recurso ao método dos mínimos quadrados

generalizados, designado por *SUR*, conforme recomenda Parresol (2001) para a modelação da biomassa.

A estrutura do sistema de equações não lineares utilizado pode ser representada da seguinte forma:

$$Y_{casca} = f_1(X_1, \beta_1) + \varepsilon_1$$

$$Y_{ramos} = f_2(X_2, \beta_2) + \varepsilon_2$$

$$Y_{folhas} = f_3(X_3, \beta_3) + \varepsilon_3$$

$$Y_{lenho} = f_4(X_4, \beta_4) + \varepsilon_4$$

$$Y_{total} = f_{total}(X_1, X_2, \dots, X_4, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_4) + \varepsilon_{total}$$

onde  $Y_{total}$  é restringido por forma a ter as mesmas variáveis independentes e os mesmos coeficientes das equações dos componentes.

O procedimento *SUR* com restrição nos parâmetros tem em consideração a correlação contemporânea dos modelos proporcionando estimadores eficientes e predições aditivas (Parresol, 1999, 2001). A extensão da correlação determina o ganho em eficiência.

A avaliação das equações parciais por componente ajustadas em simultâneo foi efectuada com base na eficiência de modelação (*EM*), quadrado médio dos resíduos (*QMR*), erro padrão das estimativas dos parâmetros e gráfico dos resíduos ponderados sobre os valores estimados. Por fim, fez-se a comparação dos erros padrões das estimativas dos parâmetros destes modelos, ponderados e reajustados iterativamente em simultâneo, com os mesmos modelos reajustados através de regressão ponderada, com o mesmo factor de ponderação.

Dada a importância do tronco principal para produção de madeira que constitui, em termos económicos, o produto mais valorizado do castanheiro em alto fuste, foram ajustadas também equações de biomassa percentual em função do diâmetro e da altura de despona para o tronco principal, sob e sobre casca. Para tal, foram utilizadas as mesmas equações utilizadas para a predição do volume percentual apresentadas no ponto 4.2.3.. Os modelos foram seleccionados com base nos mesmos critérios atrás referidos, dando especial atenção também à matriz de correlação dos parâmetros para obter indicações acerca de problemas de multicolinearidade.

O uso de várias observações provenientes da mesma árvore viola o pressuposto da regressão relativo à independência dos erros (Clutter *et al.*, 1983). Estes autores admitem todavia que a violação deste pressuposto não envies as estimativas dos parâmetros, embora os testes de significância e intervalos de confiança fiquem em parte

comprometidos, considerando o enviesamento desprezível quando se utiliza um razoável número de árvores amostra ( $n \geq 100$ ). No ajustamento destes modelos foi utilizada a regressão ponderada iterativamente com recurso à função de Huber.

Para a modelação da mineralomassa foi utilizado o mesmo procedimento para cada um dos elementos minerais considerados. Os factores de ponderação utilizados resultaram da análise dos gráficos dos resíduos obtidos com vários pesos alternativos e foram  $1/d^2 h$  (modelos *EM1* e *EM1.1*),  $1/d^2$  (modelos *EM2*, *EM2.1* e *EM3*), e  $1/d$  (modelo *EM4*), juntamente com a correcção de Huber com  $r=1$ , no reajustamento das funções em separado. No ajustamento simultâneo foram usados sempre que necessários os seguintes factores de ponderação:  $1/d$  para as folhas,  $1/d^{1.4}$  para os ramos,  $1/d^2$  para o lenho,  $1/d^2$  para a casca e  $1/d^{2.5}$  para o total.

### 5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 5.3.1. Equações de biomassa

Os modelos apresentados no ponto 5.2.4.1. foram ajustados aos dados da biomassa conforme descrito na metodologia. Entre as variáveis independentes consideradas o diâmetro na base da copa ( $d_{bc}$ ) e a respectiva altura ( $h_{bc}$ ) não apresentaram, na generalidade, uma prestação superior para a explicação dos erros dos modelos, relativamente ao diâmetro a 1,30 m de altura ( $d$ ) e à altura total ( $h$ ). Este facto, associado à maior facilidade de medição destas últimas variáveis para utilização futura dos modelos, levou a que se considerassem sobretudo as variáveis ( $d$ ) e ( $h$ ) no seu ajustamento. A utilização da profundidade da copa como variável dependente para a predição da biomassa dos ramos (modelo 9) conduziu a um aumento na eficiência do modelo, assim como uma melhoria dos gráficos de resíduos studentizados sobre os valores estimados e por isso foi considerada na análise.

No processo de ajustamento dos modelos muitas funções apresentaram coeficientes não significativos sendo por isso excluídos da análise, embora por vezes apresentassem valores da eficiência de modelação ligeiramente superiores. Assim, dos 9 modelos ajustados para cada um dos componentes, foram seleccionados, nesta fase, 3 para a casca, 2 para as folhas e flores, 2 para os ramos, 4 para o lenho com casca e sem casca e 4 para a biomassa total. No Quadro 5.5 são apresentadas as estatísticas de ajustamento, precisão e enviesamento utilizadas na selecção dos modelos, por

componente. Para além destas estatísticas considerou-se também a análise gráfica dos resíduos studentizados sobre os valores estimados, como atrás se referiu, e apreciou-se a vantagem, ou não, da utilização de variáveis independentes menos práticas, relativas à copa. Para a ordenação dos modelos foi atribuída uma escala a cada estatística de qualidade do modelo considerada, sendo classificado em primeiro lugar o modelo com menor somatório dos valores atribuídos. Nesta fase apresentam-se somente os modelos com todos os parâmetros significativos, após ponderação pela função influência de Huber com  $r=1$  e os restantes factores já referidos.

Quadro 5.5: Estatísticas de ajustamento e predição dos modelos com melhor desempenho para a biomassa por componentes, após ponderação (Huber + factores de ponderação).

Mod.	Ord	Comp.	QMR	EM	mPRESS	maPRESS	$R^2_{pred}$	P95	P5
(2)	1°	W_Casc	0,0271	0,9655	0,2605	5,5818	0,9518	15,4379	-15,2183
(6)*	2°	W_Casc	0,9444	0,9653	-0,0754	6,0640	0,9222	14,9369	-16,5228
(1)	3°	W_Casc	0,0567	0,9652	-0,1108	7,4017	0,8970	12,3498	-30,4523
(3)	1°	W_Ftot	0,8062	0,7887	-0,0180	3,8283	0,7299	10,3780	-5,7564
(1)	2°	W_Ftot	1,1177	0,8638	1,3269	4,1992	0,6192	16,3348	-5,5186
(1)	1°	W_Rviv	4,1846	0,7724	5,5598	77,8096	0,5483	340,4550	-152,2570
(9)	2°	W_Rviv	5,9177	0,7651	3,1539	71,4159	0,6162	254,7530	-226,9910
(5)	1°	W_Lenho	27,6489	0,9874	-2,1613	44,0848	0,9615	134,4670	-66,1490
(2)	2°	W_Lenho	31,7688	0,9834	-2,6892	45,8418	0,9525	137,9430	-68,5184
(1)	3°	W_Lenho	32,7542	0,9917	-1,9214	45,1397	0,9574	107,7980	-87,7958
(6)*	4°	W_Lenho	131,5000	0,9595	-6,8341	72,4407	0,8819	149,1670	-111,8540
(5)	1°	W_Tronc	33,6004	0,9869	-2,0055	49,0936	0,9599	138,3160	-72,2298
(2)	2°	W_Tronc	37,5703	0,9833	-2,6825	49,6256	0,9525	143,9250	-71,9390
(1)	3°	W_Tronc	42,0996	0,9913	-0,8111	50,2754	0,9464	118,1820	-125,3030
(6)*	4°	W_Tronc	149,2000	0,9607	-6,9824	77,5270	0,8846	154,6660	-113,2590
(6)*	1°	W_Tot	2,9359	0,9883	1,2531	60,4847	0,9827	124,1600	-149,8300
(3)	2°	W_Tot	0,2253	0,9777	6,9685	87,7773	0,9578	294,3910	-167,4080
(1)	3°	W_Tot	0,2632	0,9812	3,1295	95,1585	0,9485	311,0490	-210,4380
(2)	4°	W_Tot	0,2735	0,9724	4,3493	97,6456	0,9457	311,7890	-209,4870

\* Foi utilizado o factor de ponderação (1/d). EM, eficiência de modelação; P95, percentil 95; P5, percentil 5; mPRESS e maPRESS, média e média do valor absoluto dos resíduos PRESS; QMR, quadrado médio dos resíduos. O modelo (1) foi ajustado linearmente, com o mesmo factor de ponderação dos seus homólogos.

A análise efectuada, com base nos parâmetros atrás mencionados, conduziu à selecção dos seguintes modelos por componente:

(2) $W\_casc = 0,0141(d^2 h)^{0,7892}$	$EM = 0,9655$
(3) $W\_Ftot = d^2/(187,7-1791,6 h^{-1})$	$EM = 0,7887$
(1) $W\_Rviv = 0,00451 d^2 h$	$EM = 0,7724$
(5) $W\_Lenho = 0,00985 d^{1,7593} h^{1,4018}$	$EM = 0,9874$
(5) $W\_Tronc = 0,0142 d^{1,7243} h^{1,3582}$	$EM = 0,9869$
(6) $W\_tot = 0,1236 d^{2,3929}$	$EM = 0,9883$

Estas equações estimam a biomassa dos diferentes componentes (em kg), com base no diâmetro a  $1,30 m d$  com casca (cm) e da altura total  $h (m)$ .

Os gráficos dos resíduos studentizados vs. valores estimados, dos modelos seleccionados, após ponderação pela função influência de Huber e os factores descritos anteriormente, são apresentados na Figura 5.1. Como se pode observar os resíduos studentizados não manifestam nenhuma tendência evidente, encontrando-se no geral bem distribuídos. A ponderação efectuada permitiu corrigir a heterocedasticidade que se verificava tornando os resíduos mais homogéneos.

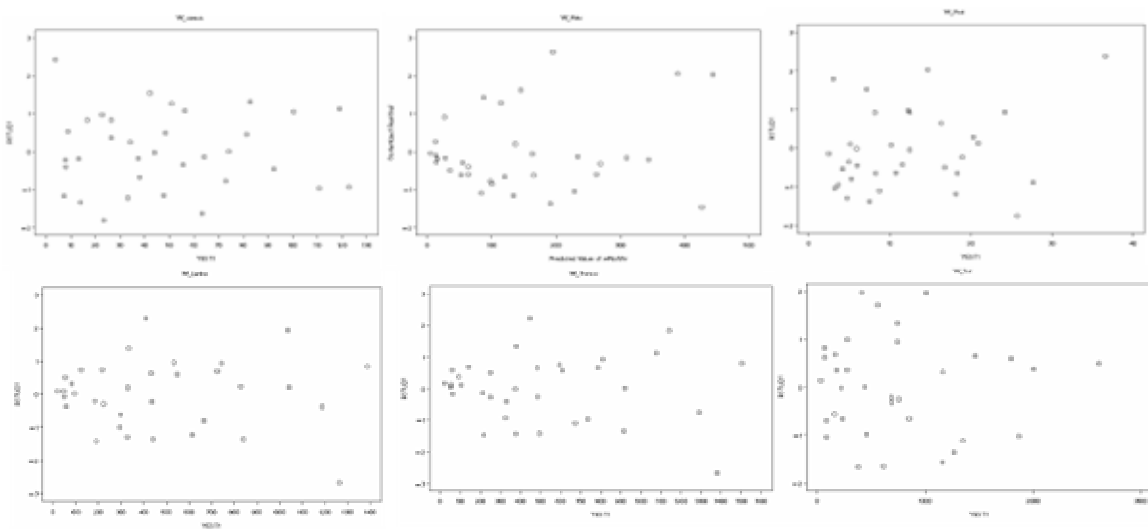


Figura 5.1: Resíduos vs. valores estimados dos modelos seleccionados para estimar a biomassa dos seguintes componentes, após ponderação (função de Huber + factores de ponderação):  $W\_casc$ ,  $W\_Rviv$ ,  $W\_Ftot$ ,  $W\_Lenho$ ,  $W\_Tronc$  e  $W\_Tot$  (leitura da esquerda para a direita e de cima para baixo).

Os gráficos em papel de probabilidades normal “QQ plot”, igualmente para os modelos seleccionados, após as ponderações efectuadas, são apresentados na Figura 5.2. A sua análise indica que a distribuição dos resíduos studentizados não se afasta do padrão de normalidade. O maior afastamento verifica-se particularmente para a

biomassa dos ramos, seguido da biomassa das folhas com um ligeiro afastamento. A estas duas componentes que fazem parte da copa está associada uma maior variabilidade, apresentando também valores inferiores da eficiência de modelação. Parresol (1999) deparou igualmente com uma maior variabilidade na copa, relativamente ao lenho, à casca ou à biomassa total, da *Quercus phellos*.

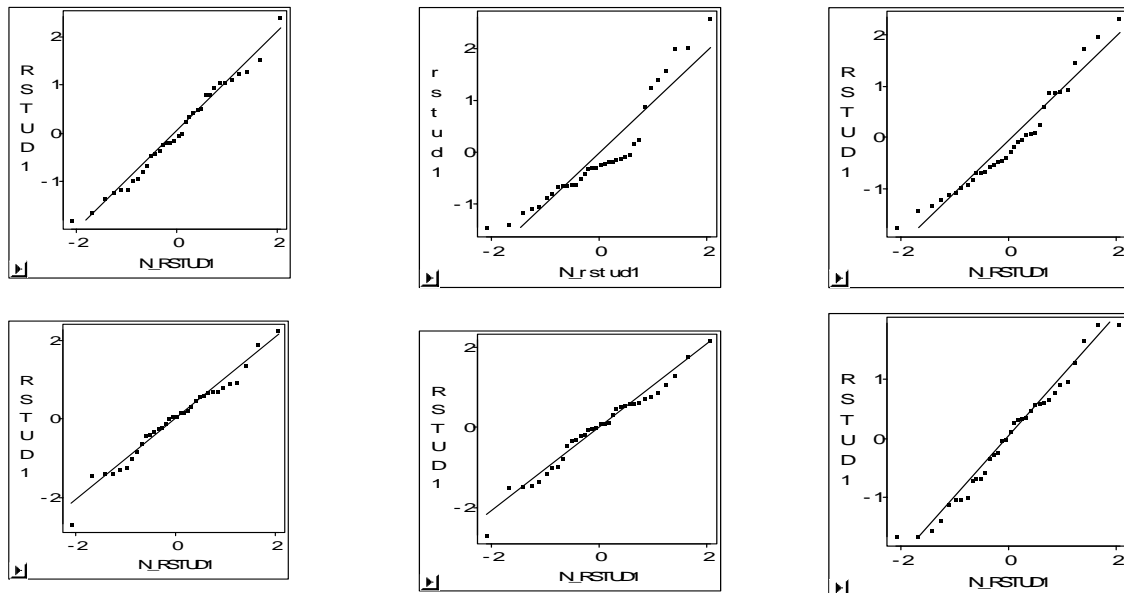


Figura 5.2: Gráficos em papel de probabilidade normal para os modelos seleccionados para a biomassa dos seguintes componentes, após ponderação (função de Huber + factores de ponderação):  $W\_casc$ ,  $W\_Rviv$ ,  $W\_Ftot$ ,  $W\_Lenho$ ,  $W\_Tronc$  e  $W\_Tot$ , (leitura da esquerda para a direita e de cima para baixo).

Embora se apresente um modelo independente para a estimação da biomassa total, esta deverá ser estimada com base num modelo formado pela combinação dos submodelos dos diferentes componentes da árvore em causa, para que se possa garantir a sua aditividade. Assim, começou-se por considerar os modelos seleccionados sem ponderação no ajustamento em separado. Os valores dos parâmetros foram utilizados como valores iniciais no ajustamento simultâneo pelo processo das regressões aparentemente não relacionadas (*SUR*). Durante o processo de ajustamento simultâneo dos modelos (2) para a casca, (3) para as folhas e flores, (1) para os ramos vivos e (5) para o tronco sem casca, seleccionados como os melhores das respectivas componentes no ajustamento em separado, verificou-se que estes não apresentavam a mesma prestação quando ajustados em simultâneo, nomeadamente o modelo (3), na medida em que se obtiveram valores muito grandes dos coeficientes e valores negativos da

eficiência de modelação. Por este facto foram testadas outras combinações de equações, de entre as pré-seleccionadas para os diferentes componentes. O sistema de equações que proporcionou melhores resultados é constituído pelos seguintes submodelos:

$$\begin{cases} W_{\_Ftot} = \beta_{10} d^2 h \\ W_{\_Rviv} = \beta_{20} d^2 h \\ W_{\_Casc} = \beta_{30} d^{\beta_{31}} \\ W_{\_Lenho} = \beta_{40} d^{\beta_{41}} h^{\beta_{42}} \\ W_{tot} = \beta_{10} d^2 h + \beta_{20} d^2 h + \beta_{30} d^{\beta_{31}} + \beta_{40} d^{\beta_{41}} h^{\beta_{42}} \end{cases}$$

Devido à heterocedasticidade detectada na análise gráfica dos resíduos<sup>1</sup>, mais evidente na componente ramos ( $W_{\_Rviv}$ ), reajustou-se o sistema de equações com diferentes factores de ponderação. No Quadro 5.6 são apresentados os valores obtidos para as estimativas dos coeficientes e respectivos erros padrões assintóticos, factores de ponderação e estatísticas de ajustamento, quer para o reajustamento dos modelos em simultâneo, quer em separado.

Quadro 5.6: Comparação dos modelos ajustados separadamente e em simultâneo, com base no erro padrão dos coeficientes e eficiência de modelação, após ponderação.

Equações	Parâmetros (erro padrão)	Factor ponderação	EM	Parâmetros (erro padrão)	Factor ponderação	EM
	Ajustadas em separado			Ajustadas em simultâneo ( <i>ITSUR</i> )		
(1)W_ <i>Ftot</i>	$\beta_{10}=0,00036$ (0,00003)	$1/(d^{0,4} h^{0,5})$	0,64920	$\beta_{10}=0,00033$ (0,00002)	$1/(d^{0,4} h^{0,5})$	0,65120
(1)W_ <i>Rviv</i>	$\beta_{20}=0,00497$ (0,00050)	$1/(d^{0,8} h^{1,4})$	0,66205	$\beta_{20}=0,00440$ (0,00045)	$1/(d^{0,8} h^{1,4})$	0,58650
(6)W_ <i>casc</i>	$\beta_{30}=0,07950$ (0,02600) $\beta_{31}=1,7897$ (0,08600)	1/d	0,95472	$\beta_{30}=0,06574$ (0,01510) $\beta_{31}=1,84096$ (0,06210)	1/d	0,93540
(5)W_ <i>lenho</i>	$\beta_{40}=0,00857^*$ (0,00467) $\beta_{41}=1,6620$ (0,08580) $\beta_{42}=1,55870$ (0,19570)	$1/(d^{0,8} h^{0,4})$	0,98007	$\beta_{40}=0,02044$ (0,00513) $\beta_{41}=1,76603$ (0,06710) $\beta_{42}=1,16402$ (0,13710)	$1/(d^{0,8} h^{0,4})$	0,96890
W_ <i>tot</i>					$1/(d h)^2$	0,90810

\* Parâmetro não significativo. EM, eficiência de modelação;  $\beta_i$ , parâmetros das equações; d, diâmetro à altura do peito sobre casca (cm); h, altura total (m).

Como se pode observar no Quadro 5.6 os erros padrões assintóticos dos coeficientes das equações ajustadas pelo procedimento *ITSUR* são inferiores aos

<sup>1</sup> Resíduos ordinários ponderados uma vez que a opção *ITSUR* do procedimento *PROC MODEL* (SAS Institute, 1999-2001) não permite a obtenção dos resíduos studentizados.

coeficientes obtidos através do ajustamento em separado para todas as componentes à excepção do coeficiente  $\beta_{40}$  da componente  $W\_lenho$  que apresenta um valor ligeiramente superior. Contudo, convém referir que o coeficiente  $\beta_1$  da componente  $W\_Lenho$  não é significativo com o factor de ponderação utilizado, passando a significativo quando ajustado em simultâneo pelo processo *ITSUR*. Por outro lado, houve necessidade de ponderar também  $W\_Tot$  no ajustamento em simultâneo, o que altera o peso das equações dos diferentes componentes que, por este facto, é diferente do peso utilizado no ajustamento em separado. Todavia os valores do erro padrão assintótico dos coeficientes das equações ajustadas em simultâneo são inferiores mesmo na ausência de ponderação da biomassa total ( $W\_Tot$ ). A diminuição do erro dos coeficientes indica que existe correlação contemporânea e portanto um ganho em eficiência na estimação dos parâmetros com o ajustamento dos modelos em simultâneo, ao mesmo tempo que se obtém um modelo para a biomassa total formado pela combinação dos submodelos dos diferentes componentes da árvore em causa, para que se possa assegurar a sua aditividade.

O sistema de 5 equações obtido apresenta uma maior consistência dos parâmetros estimados e uma eficiência de modelação mais realista. A análise dos resíduos ordinários ponderados vs. valores estimados, para os submodelos das componentes consideradas, não apresenta qualquer padrão indicativo de heterocedasticidade como se pode ver na Figura 5.3, embora denotem alguma assimetria na distribuição dos resíduos.

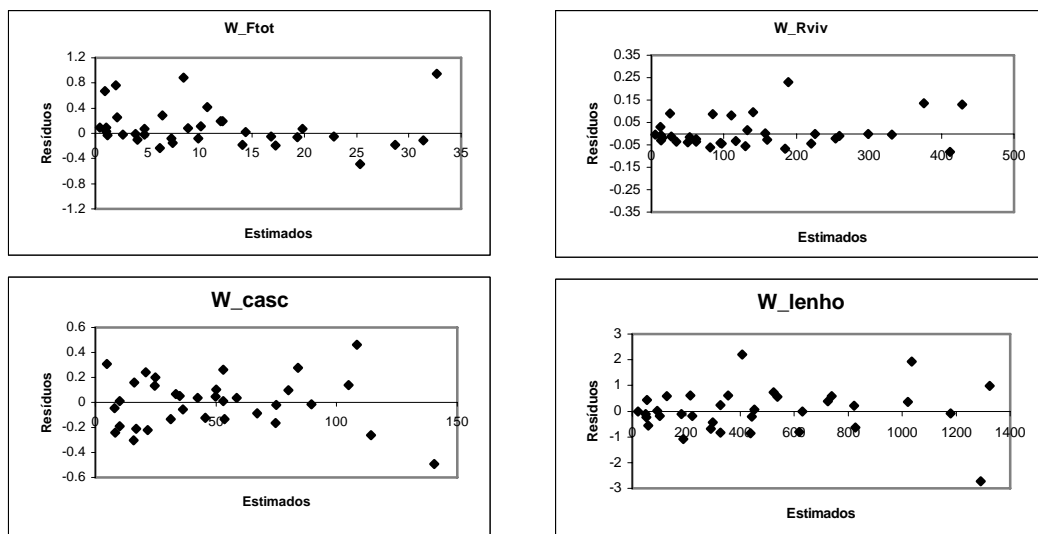


Figura 5.3: Resíduos ponderados vs. valores estimados para as componentes da biomassa ajustadas pelo processo *ITSUR* com ponderação.

Os submodelos apresentam gráficos de resíduos em função dos valores estimados bastante razoáveis assim como o modelo total, como se pode ver na Figura 5.4.

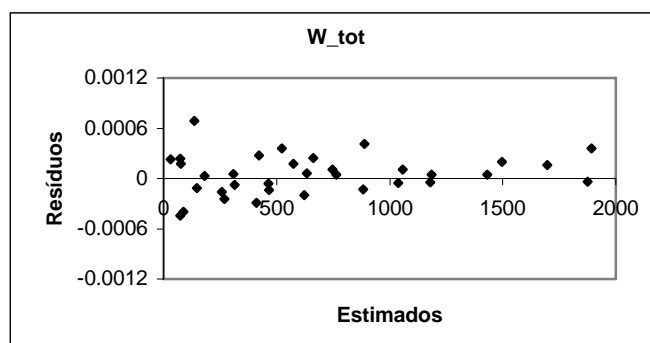


Figura 5.4: Resíduos ponderados em função dos valores estimados para a biomassa total da árvore, obtida através da aditividade das biomassa parciais pelo processo *ITSUR*.

Uma vez que a opção *ITSUR* não permite efectuar a correcção de *Huber*, nem o cálculo dos resíduos studentizados, alguns destes modelos apresentam gráficos em papel de probabilidades dos resíduos ordinários que denotam algum afastamento da normalidade. Apenas a casca apresenta um padrão de normalidade evidente. Como é sabido a não normalidade dos resíduos pode invalidar os resultados do teste “*t* de Student” de significância dos parâmetros, contudo, este teste é considerado robusto para afastamentos moderados da normalidade (Nigh, 2000), como é o caso.

Os valores médios da análise do enviesamento e precisão dos melhores modelos ajustados simultaneamente, por classe de diâmetro e de altura, são apresentados no Quadro 5.7. Como se pode observar os maiores erros em todas as componentes ocorrem na classe de diâmetro de *60 cm*, provavelmente porque a estimativa se baseia na observação de um único indivíduo desta classe, localizado nas imediações de uma clareira e conseqüentemente, com mais ramos e folhas do que o que seria de esperar, se a mesma árvore se encontrasse rodeada de todos os lados por outros indivíduos do povoamento. Como já foi referido anteriormente (nomeadamente no *Capítulo IV*) foi ponderada a hipótese de eliminar esta árvore mas, dada a dificuldade de encontrar árvores nas maiores classes de diâmetro, optou-se por mantê-la. Por este facto esta classe não será considerada na análise dos erros de predição. Assim, duma maneira geral, os modelos apresentados são indicados sobretudo para as classes de diâmetro dos

15 aos 55 cm, onde se verifica um maior número de observações e conseqüentemente menores erros médios.

Quadro 5.7: Média dos resíduos e média dos valores absolutos dos resíduos, por classes de diâmetro e altura, para os submodelos dos diferentes componentes da biomassa ajustados simultaneamente (resíduos ordinários ponderados).

Mod.	Classes de diâmetro (cm)										
	10 (n=1)	15 (n=4)	20 (n=3)	25 (n=4)	30 (n=4)	35 (n=4)	40 (n=4)	45 (n=4)	50 (n=2)	55 (n=3)	60 (n=1)
W_Ftot	0,09  0,09	0,19  0,20	0,33  0,34	-0,02  0,05	-0,05  0,19	0,25  0,29	0,15  0,25	-0,08  0,08	$0,50 \cdot 10^{-2}$  0,06	-0,27  0,27	0,94  0,94
W_Rviv	$-0,04 \cdot 10^{-2}$  0,4 $10^{-2}$	-0,01  0,02	0,01  0,05	-0,03  0,03	-0,01  0,06	$0,8 \cdot 10^{-3}$  0,05	$-0,90 \cdot 10^{-3}$  0,05	0,04  0,07	$-0,7 \cdot 10^{-2}$  0,01	0,01  0,07	0,13  0,13
W_Casc	0,30  0,30	-0,13  0,13	-0,13  0,23	0,08  0,19	-0,02  0,08	0,01  0,07	0,04  0,11	-0,04  0,09	0,13  0,14	0,12  0,29	-0,48  0,48
W_Lenho	$-0,40 \cdot 10^{-2}$  0,4 $10^{-2}$	-0,06  0,29	0,11  0,19	-0,34  0,51	-0,53  0,54	0,37  0,98	0,21  0,30	-0,04  0,61	0,52  0,52	0,94  0,94	-2,50  2,50
Mod.	Classes de altura (m)										
	12 (n=1)	14 (n=4)	16 (n=2)	18 (n=1)	20 (n=2)	22 (n=7)	24 (n=8)	26 (n=6)	28 (n=1)	30 (n=2)	
W_Ftot	0,09  0,09	0,36  0,37	0,17  0,17	0,88  0,88	0,19  0,21	0,01  0,12	0,06  0,20	-0,05  0,20	-0,06  0,06	-0,15  0,15	
W_Rviv	$-0,4 \cdot 10^{-2}$  0,4 $10^{-2}$	0,02  0,04	-0,01  0,01	0,08  0,08	0,03  0,06	-0,01  0,04	0,02  0,07	0,01  0,03	$-0,3 \cdot 10^{-2}$  0,3 $10^{-2}$	-0,08  0,08	
W_Casc	0,30  0,30	-0,17  0,17	-0,18  0,18	0,10  0,10	0,09  0,09	0,04  0,15	-0,11  0,30	0,11  0,17	-0,01  0,01	0,16  0,30	
W_Lenho	$-0,4 \cdot 10^{-2}$  0,4 $10^{-2}$	-0,18  0,18	0,17  0,30	0,48  0,25	0,25  0,25	-0,38  0,48	-0,24  1,02	-0,24  0,57	1,01  1,01	0,39  0,57	

W, biomassa em kg.

Duma maneira geral não se manifesta uma tendência na grandeza dos erros com a dimensão das árvores, quer em diâmetro quer em altura.

Os submodelos das componentes ramos e lenho sobrestimam para a maioria das classes de diâmetro, sendo por isso enviesados negativamente, enquanto as restantes componentes, também enviesadas, equilibram mais ou menos os valores obtidos por excesso e por defeito, tudo dependendo da classe de diâmetro a que a árvore pertence.

Em termos da distribuição dos erros por classes de altura verifica-se que os maiores erros na estimativa dos ramos ocorrem nas classes dos 30 m e 18 m, esta última só com uma árvore observada. Para as folhas e lenho os maiores erros verificam-se na classe de 18 m e para a casca na classe de altura dos 10 m. Duma maneira geral as componentes folhas e casca são estimadas por defeito para a maioria das classes de altura, ou seja, os modelos são enviesados positivamente. No que se refere aos ramos e lenho as classes em que se verifica uma sobrestima encontram-se equilibradas com as

classes que subestimam, tudo depende do leque de alturas das árvores da parcela em que se pretenda estimar a sua biomassa.

### 5.3.1.1. Equações de biomassa percentual para o tronco principal

Das funções de biomassa percentual em função do diâmetro de despona, ajustadas por regressão ponderada iterativamente através do método de estimador de *Huber* com  $r=1$ , seleccionou-se o modelo *EVPD5* de Reed e Green (1984) por apresentar um desempenho superior aos restantes em todas as estatísticas de ajustamento e predição utilizadas.

No que se refere às equações de biomassa percentual em função da altura de despona, foi seleccionado o modelo *EVPH1* de Cao *et al.* (1980) ponderado pela função de *Huber* com  $r=2$ . No Quadro 5.8 são apresentadas as estatísticas de ajustamento, enviesamento e precisão dos modelos de predição de biomassa com e sem casca (notação *cc* e *sc*, respectivamente), seleccionados quer para um diâmetro de despona com casca, quer para um diâmetro de despona sem casca, não incluindo o cepo, e ainda para uma altura de despona.

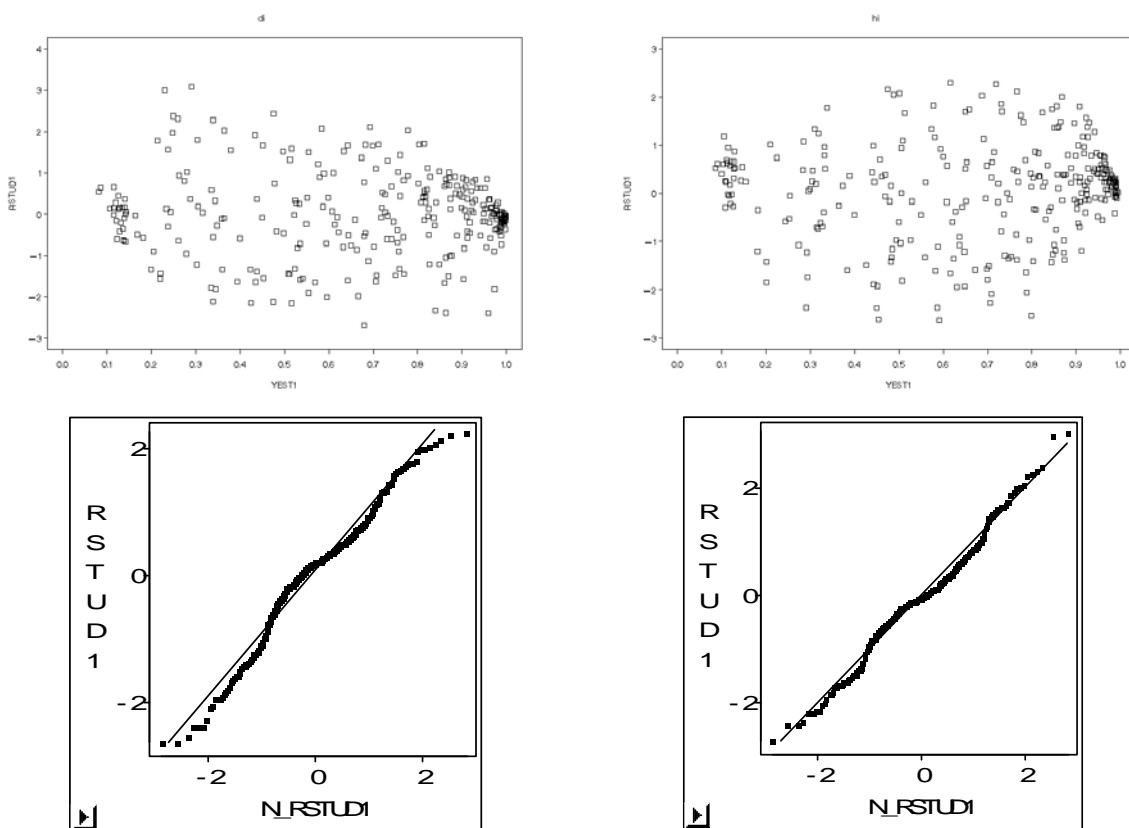
Quadro 5.8: Estatísticas de ajustamento e predição dos modelos com melhor desempenho para a biomassa percentual do tronco, em função de um diâmetro de despona e de uma altura de despona, após *IRWLS*.

Modelo	QMR	EM	mPRESS	maPRESS	$R^2_{pred}$	P95	P5
Equações de biomassa percentual em função do diâmetro de despona (n=295)							
EVPD5_cc	0,0013	0,9832	-0,0002	0,0327	0,9694	0,0793	-0,0778
EVPD5_sc*	0,0013	0,9827	-0,0008	0,0327	0,9691	0,0741	-0,0853
EVPD5_sc**	0,0013	0,9830	-0,0002	0,0325	0,9690	0,0779	-0,0823
Equação de biomassa percentual em função da altura de despona (n=295)							
EVPH1_cc	0,0008	0,9897	0,0018	0,0231	0,9888	0,0510	-0,0533
EVPH1_sc	0,0009	0,9704	0,0017	0,0233	0,9885	0,0509	-0,0559

cc, Com casca; sc, Sem casca;\*, Estima a biomassa percentual do tronco sem casca em função do diâmetro sem casca; \*\*, Estima a biomassa percentual do tronco sem casca em função do diâmetro com casca.

Na Figura 5.5 são apresentados os gráficos dos resíduos studentizados vs. valores estimados e gráficos em papel de probabilidades normal para os modelos seleccionados. Os gráficos de resíduos dos modelos sem casca são idênticos aos do

mesmo modelo com casca pelo que se optou por apresentar apenas os modelos com casca. Como se pode observar os gráficos de resíduos studentizados vs. valores estimados não evidenciam qualquer tendência. A aparente convergência para as extremidades é devida às restrições a que estes modelos estão sujeitos, ou seja, a percentagem da biomassa total do tronco  $R = W_m/W = 1$  quando  $h=hi$  ou  $di=0$ , sendo  $h$  a altura total,  $hi$  a altura de despona,  $d$  o diâmetro a 1,30 m de altura,  $di$  o diâmetro de despona,  $W$  a biomassa total do tronco e  $W_m$  a biomassa mercantil para uma determinada despona. A análise dos gráficos dos resíduos studentizados em papel de probabilidades normal “QQ plot” revela que os resíduos studentizados não se afastam dos padrões de normalidade.



a)

b)

Figura 5.5: Gráficos dos resíduos studentizados vs. valores estimados e em papel de probabilidades normal dos modelos seleccionados para a biomassa percentual em função do diâmetro de despona  $di$  com casca a) e altura de despona  $hi$  b), após ponderação (IRWLS).

De seguida apresentam-se os modelos obtidos para a predição da biomassa percentual do tronco principal, com e sem casca, quer para um diâmetro de despona, quer para uma altura de despona (a designação sem casca é indicada pelo sub índice  $sc$ ,

acoplado aos respectivos diâmetros). O modelo  $EVPD5_{sc}$  foi ajustado em duas versões, de forma a permitir estimar a biomassa sem casca quer a partir do diâmetro com casca quer a partir do diâmetro sem casca, para facilitar a sua aplicação prática.

*Biomassa percentual do tronco em função de di:*

$$R = 1 - 0,4111 di^{3,1655} / (d^{3,1798} h^{-0,2528}) \quad EM=0,9832$$

*Biomassa percentual do lenho em função de di:*

$$R = 1 - 0,3863 di_{sc}^{3,1493} / (d_{sc}^{3,1390} h^{-0,2425}) \quad EM=0,9827$$

$$R = 1 - 0,3969 di^{3,2366} / (d^{3,2471} h^{-0,2578}) \quad EM=0,9830$$

*Biomassa percentual do tronco em função de hi:*

$$R = 1 - (0,9313 (h-hi)^{2,3475} / h^{2,3228}) \quad EM=0,9897$$

*Biomassa percentual do lenho em função de hi:*

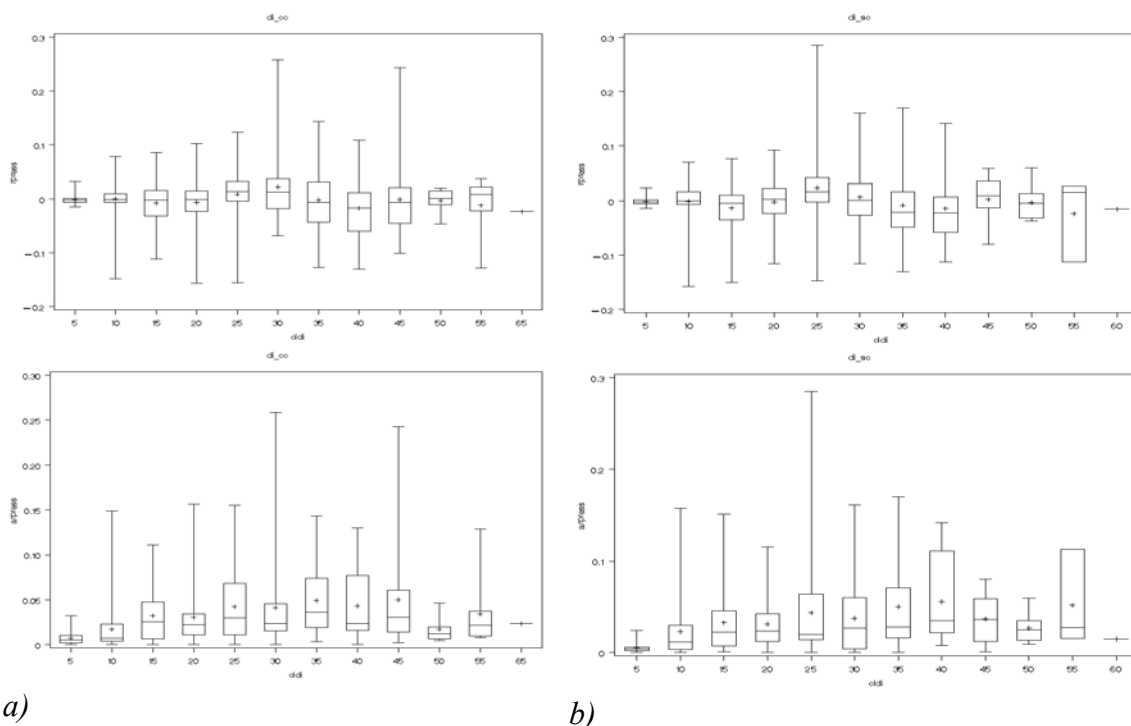
$$R = 1 - (0,9210 (h-hi)^{2,3980} / h^{2,3707}) \quad EM=0,9704$$

Estas equações permitem estimar a percentagem da biomassa do tronco com ou sem casca a partir do diâmetro à altura do peito  $d$  (cm), do diâmetro mercantil  $di$  (cm) e da altura total da árvore  $h$  (m), ou ainda estimar a percentagem da biomassa do tronco a partir da altura total  $h$  e da altura de despona  $hi$  (m). Quando o valor de  $R$  é multiplicado pela biomassa total do tronco, obtém-se a biomassa até um determinado diâmetro ou altura de despona. Para o efeito poderão ser usadas as equações de predição da biomassa do lenho ( $W_{lenho}$ ) ou do tronco ( $W_{tronco}$ ) obtidas anteriormente no ponto 5.3.1..

Os gráficos dos resíduos  $PRESS$  e do valor absoluto dos mesmos dos modelos seleccionados, por classe de diâmetro  $di$  ou de altura  $hi$ , dependendo do tipo de variável de despona utilizada, são apresentados nas Figuras 5.6 e 5.7.

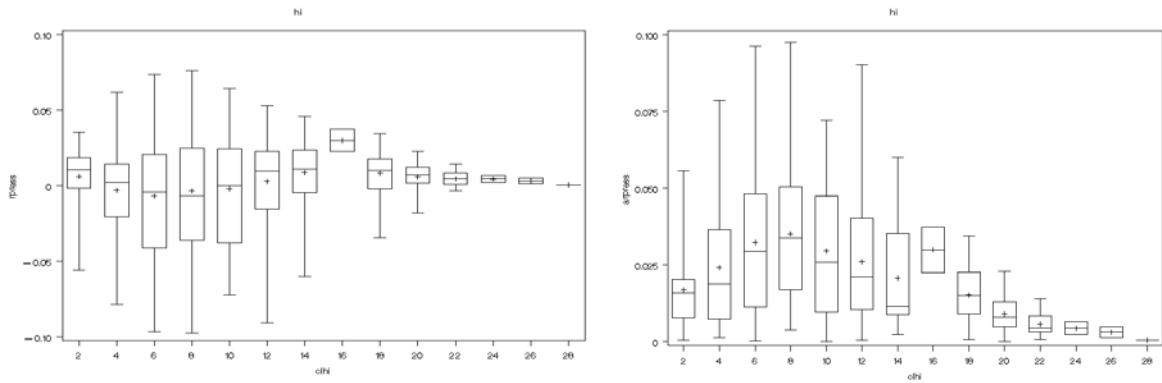
No que se refere à biomassa percentual em função de um diâmetro de despona, o erro médio do modelo  $EVPD5$ , quer com casca quer sem casca, é baixo, atingindo um valor médio máximo de  $-0,023$ , ou seja,  $2,3$  % por excesso na classe de diâmetro de despona sobre casca de  $65$  cm, com uma única observação, e  $0,024$  por defeito na classe de diâmetro de despona sob casca de  $25$  cm ( $2,4$  %) e  $2,3$  %, por excesso, na classe de  $55$  cm também sob casca. De uma maneira geral os modelos de biomassa percentual para um diâmetro de despona, quer com casca quer sem casca, são ligeiramente enviesados negativamente, sobrestimando os valores preditos para a

maioria das classes de diâmetro de despona consideradas. O erro médio absoluto máximo é de 5 % para a classe de diâmetro de despona com casca de 45 cm e de 5,6 % para a classe de diâmetro de despona sem casca de 40 cm. Os menores erros médio e médio em valor absoluto ocorrem nas classes de diâmetro de despona inferiores a 25 cm. Assim, o erro com a aplicação destes modelos será tanto mais reduzido quanto menor for o diâmetro de despona considerado para o aproveitamento comercial do tronco. Como o diâmetro mínimo de despona para fins comerciais das espécies folhosas para produção de madeira de qualidade é de 20 a 22 cm, o erro cometido na estimação da biomassa percentual para essa gama de diâmetros superiores do tronco é bastante reduzido.



a) b)   
 Figura 5.6: Diagrama de extremos e quartis dos resíduos *PRESS* e respectivos valores absolutos (*aPRESS*) dos modelos percentuais da biomassa do tronco sobre casca a) e sob casca b), para um diâmetro de despona.

Considerando a altura de despona, verifica-se, duma maneira geral um erro de predição baixo, atingindo um valor médio máximo de 3 % na classe de 16 m de altura de despona. Por sua vez a média do valor absoluto do erro atinge o seu maior valor na classe dos 8 m de altura de despona, diminuindo fortemente a partir dos 18 m. O modelo *EVPHI*, seleccionado para estimar a biomassa percentual em função de uma altura de despona, apresenta um ligeiro enviesamento positivo estimando valores por defeito para a maioria das classes de altura de despona consideradas na análise.



a) b)  
 Figura 5.7: Diagrama de extremos e quartis dos resíduos *PRESS* a) e respectivos valores absolutos (*aPRESS*) b) dos modelos percentuais da biomassa do tronco com casca para uma altura de despona.

### 5.3.2. Equações de mineralomassa

A concentração dos diferentes minerais só por si não apresenta uma relação funcional aceitável com as variáveis da árvore  $d$  e  $h$ . Desta forma apenas é possível estimar a mineralomassa em função de variáveis da árvore.

Para a estimação da mineralomassa ajustaram-se os modelos referidos no ponto 5.2.4.2. aos dados respectivos conforme descrito na metodologia. Face aos resultados obtidos para as equações de biomassa, consideraram-se como variáveis independentes o diâmetro a  $1,30\text{ m}$  de altura  $d$  e a altura total  $h$ .

No processo de ajustamento dos modelos as equações não lineares apresentaram quase sempre coeficientes não significativos, para todos ou quase todos os componentes da mineralomassa e elementos minerais considerados. As funções lineares e não lineares com parâmetros não significativos foram excluídas da análise. Assim, dos 13 modelos ajustados aos compartimentos de mineralomassa considerados para cada um dos 8 elementos minerais, apuraram-se nesta primeira fase, com todos os parâmetros significativos, um mínimo de 2 e um máximo de 6 funções, por componente, dentro de cada elemento. Estes modelos foram posteriormente reajustados com a função de *Huber* e os factores de ponderação já referidos, com vista à correcção da heterocedasticidade e dos afastamentos da normalidade verificados. Dado o elevado número de modelos obtidos para todas as componentes e elementos minerais considerados, apresenta-se apenas o modelo final para cada um dos compartimentos da mineralomassa, por elemento, após ponderação. A selecção foi efectuada com base nos critérios referidos na

metodologia dando especial atenção à significância dos parâmetros e aos gráficos de resíduos studentizados e em papel de probabilidades normal, para além das diferentes estatísticas utilizadas. No Quadro 5.9 são apresentadas as estatísticas de ajustamento, precisão e enviesamento dos modelos seleccionados, por componentes e elementos minerais considerados. A capacidade preditiva dos modelos, para a maioria dos elementos minerais, não é muito elevada. Os maiores valores são apresentados pelo carbono e azoto.

Face ao elevado número de modelos envolvidos não se apresentam os gráficos dos resíduos studentizados vs. valores estimados e em papel de probabilidades normal. No entanto, a ponderação efectuada permitiu corrigir os afastamentos da normal bem como a heterocedasticidade que antes se verificava, na maioria das situações.

Também aqui se procurou obter um modelo para estimação da mineralomassa total formado pela combinação dos submodelos dos diferentes componentes da mineralomassa da árvore em causa, para que se possa garantir a sua aditividade. O ajustamento foi efectuado com base no procedimento *ITSUR* do programa *SAS/STAT*, repetindo-se o processo para cada um dos elementos considerados.

Quadro 5.9: Estatísticas de ajustamento e predição dos modelos com melhor desempenho para a mineralomassa por componentes e por elemento, após ponderação (Huber + factores de ponderação).

Elem.	Mod	Comp.	QMR	R <sup>2</sup> <sub>aj.</sub>	mPRESS	maPRESS	R <sup>2</sup> <sub>pred</sub>	P95	P5
N	EM1.1	W_Casc	0,507 10 <sup>-7</sup>	0,957	-0,003	0,033	0,862	0,065	-0,101
	EM3	W_Ftot	0,718 10 <sup>-5</sup>	0,837	0,007	0,076	0,715	0,264	-0,163
	EM3	W_Rviv	0,2357 10 <sup>-4</sup>	0,767	0,043	0,181	0,477	0,832	-0,260
	EM3	W_Lenho	0,284 10 <sup>-4</sup>	0,830	0,054	0,180	0,417	0,530	-0,286
	EM3	W_Tronc	0,257 10 <sup>-3</sup>	0,944	0,096	0,611	0,803	2,853	-1,168
	EM1.1	W_Tot	0,536 10 <sup>-5</sup>	0,900	0,083	0,431	0,720	1,929	-0,829
P	EM3	W_Casc	0,216 10 <sup>-7</sup>	0,895	0,522 10 <sup>-3</sup>	0,005	0,632	0,016	-0,010
	EM3	W_Ftot	0,372 10 <sup>-7</sup>	0,831	0,665 10 <sup>-3</sup>	0,005	0,672	0,015	-0,008
	EM3	W_Rviv	0,608 10 <sup>-7</sup>	0,660	0,006	0,027	0,309	0,102	-0,040
	EM3	W_Lenho	0,825 10 <sup>-6</sup>	0,600	0,004	0,036	0,174	0,133	-0,097
	EM3	W_Tronc	0,466 10 <sup>-5</sup>	0,882	0,004	0,081	0,634	0,211	-0,193
	EM3	W_Tot	0,005	0,803	0,008	0,066	0,509	0,327	-0,145

Quadro 5.9: (continuação). Estatísticas de ajustamento e predição dos modelos com melhor desempenho para a mineralomassa por componentes e por elemento, após ponderação (Huber + factores de ponderação).

Elem.	Mod	Comp.	QMR	R <sup>2</sup> aj.	mPRESS	maPRESS	R <sup>2</sup> pred	P95	P5
K	EM1.1	W_Casc	0,350 10 <sup>-7</sup>	0,822	0,005	0,031	0,578	0,099	-0,049
	EM3	W_Ftot	0,144 10 <sup>-5</sup>	0,763	0,004	0,033	0,633	0,081	-0,056
	EM3	W_Rviv	0,786 10 <sup>-5</sup>	0,752	0,016	0,096	0,524	0,274	-0,135
	EM1.1	W_Lenho	0,156 10 <sup>-3</sup>	0,428	0,025	0,078	0,088	0,192	-0,143
	EM1.1	W_Tronc	0,002	0,868	0,034	0,393	0,618	1,034	-0,753
	EM3	W_Tot	0,036	0,925	0,023	0,171	0,719	0,398	-0,274
Ca	EM3	W_Casc	0,392 10 <sup>-4</sup>	0,852	-0,009	0,224	0,242	0,580	-0,629
	EM3	W_Ftot	0,337 10 <sup>-6</sup>	0,749	0,002	0,016	0,451	0,049	-0,021
	EM3	W_Rviv	0,359 10 <sup>-4</sup>	0,707	0,027	0,198	0,401	0,631	-0,492
	EM1.1	W_Lenho	0,352 10 <sup>-3</sup>	0,773	0,023	0,148	0,538	0,673	-0,258
	EM1.1	W_Tronc	0,088	0,891	0,119	2,260	0,498	5,256	-6,362
	EM1	W_Tot	0,414 10 <sup>-5</sup>	0,882	0,020	0,286	0,870	0,687	-0,565
Mg	EM3	W_Casc	0,752 10 <sup>-6</sup>	0,779	0,408 10 <sup>-3</sup>	0,024	0,357	0,064	-0,048
	EM3	W_Ftot	0,229 10 <sup>-6</sup>	0,822	0,002	0,014	0,719	0,040	-0,022
	EM3	W_Rviv	0,283 10 <sup>-5</sup>	0,759	0,016	0,059	0,465	0,232	-0,083
	EM1.1	W_Lenho	0,229 10 <sup>-4</sup>	0,874	0,006	0,037	0,681	0,151	-0,071
	EM3	W_Tronc	0,001	0,893	0,025	0,243	0,637	0,845	-0,540
	EM1	W_Tot	0,479 10 <sup>-6</sup>	0,818	0,023	0,125	0,642	0,326	-0,203
S	EM1.1	W_Casc	0,321 10 <sup>-9</sup>	0,835	0,128 10 <sup>-4</sup>	0,003	0,510	0,010	-0,009
	EM3	W_Ftot	0,155 10 <sup>-7</sup>	0,852	0,143 10 <sup>-3</sup>	0,003	0,692	0,009	-0,009
	EM3	W_Rviv	0,351 10 <sup>-7</sup>	0,797	0,001	0,007	0,619	0,036	-0,010
	EM1.1	W_Lenho	0,260 10 <sup>-4</sup>	0,616	0,008	0,036	0,314	0,183	0,054
	EM1.1	W_Tronc	0,956 10 <sup>-4</sup>	0,775	0,008	0,074	0,461	0,239	-0,126
	EM1.1	W_Tot	0,397 10 <sup>-7</sup>	0,827	0,008	0,034	0,631	0,159	-0,060
B*	EM3	W_Casc	0,119 10 <sup>-4</sup>	0,915	0,004	0,129	0,780	0,273	-0,292
	EM3	W_Ftot	0,491 10 <sup>-5</sup>	0,684	0,001	0,055	0,507	0,236	-0,090
	EM3	W_Rviv	0,125 10 <sup>-3</sup>	0,786	0,088	0,397	0,562	1,154	-0,513
	EM3	W_Lenho	0,150 10 <sup>-3</sup>	0,806	0,011	0,407	0,576	0,997	-1,191
	EM3	W_Tronc	0,168 10 <sup>-3</sup>	0,927	0,083	1,475	0,822	4,063	-3,473
	EM1.1	W_Tot	0,237 10 <sup>-4</sup>	0,915	-0,006	0,831	0,819	2,335	-2,487
C	(2)	W_Casc	0,437 10 <sup>-3</sup>	0,963	0,071	3,074	0,950	8,348	-7,686
	EM3	W_Ftot	0,004	0,838	0,152	1,976	0,712	5,862	-3,541
	EM3	W_Rviv	0,887	0,757	8,031	35,974	0,5602	188,415	-52,166
	(2)	W_Lenho	0,012	0,978	-1,141	26,027	0,933	64,273	-40,100
	(2)	W_Tronc	0,090	0,982	-3,611	52,653	0,946	156,171	-103,883
	(6)	W_Tot	0,860	0,984	-0,942	34,370	0,972	66,810	-107,667

\*Mineralomassa em grama (g), nos restantes elementos em quilograma (kg). QMR, quadrado médio dos resíduos; R<sup>2</sup>aj, R<sup>2</sup> ajustado; mPRESS e maPRESS, média e média do valor absoluto dos resíduos PRESS; P95, percentil 95; P5, percentil 5.

A seguir apresentam-se os modelos finais, obtidos por regressão ponderada pela função influência de Huber com  $r = 1$  e diversos pesos, com todos os parâmetros significativos, para cada componente e elemento mineral bem como para o total da árvore acima do solo:

### **Azoto**

$$N\_Casc = 0,6260 \cdot 10^{-5} d^2 h;$$

$$N\_Ftot = 0,1768 \cdot 10^{-3} d^2;$$

$$N\_Rviv = 0,2505 \cdot 10^{-3} d^2;$$

$$N\_Lenho = 0,3232 \cdot 10^{-3} d^2;$$

$$N\_Tronc = 0,00193 d^2;$$

$$N\_Tot = 0,4138 \cdot 10^{-4} d^2 h;$$

### **Fósforo**

$$P\_Casc = 0,1250 \cdot 10^{-4} d^2;$$

$$P\_Ftot = 0,1230 \cdot 10^{-4} d^2;$$

$$P\_Rviv = 0,3070 \cdot 10^{-4} d^2;$$

$$P\_Lenho = 0,3217 \cdot 10^{-4} d^2;$$

$$P\_Tronc = 0,1713 \cdot 10^{-3} d^2;$$

$$P\_Total = 0,1030 \cdot 10^{-3} d^2;$$

### **Potássio**

$$K\_Casc = 0,2400 \cdot 10^{-5} d^2 h;$$

$$K\_Ftot = 0,6220 \cdot 10^{-4} d^2;$$

$$K\_Rviv = 0,1370 \cdot 10^{-3} d^2;$$

$$K\_Lenho = 0,2430 \cdot 10^{-5} d^2 h;$$

$$K\_Tronc = 0,3036 \cdot 10^{-4} d^2 h;$$

$$K\_Total = 0,4060 \cdot 10^{-3} d^2;$$

### **Cálcio**

$$Ca\_Casc = 0,4152 \cdot 10^{-3} d^2;$$

$$Ca\_Ftot = 0,2824 \cdot 10^{-4} d^2;$$

$$Ca\_Rviv = 0,2671 \cdot 10^{-3} d^2;$$

$$Ca\_Lenho = 0,8670 \cdot 10^{-5} d^2 h;$$

$$Ca\_Tronc = 0,2041 \cdot 10^{-3} d^2 h;$$

$$Ca\_Total = 0,1062 + 0,3777 \cdot 10^{-4} d^2 h;$$

### **Magnésio**

$$Mg\_Casc = 0,4750 \cdot 10^{-4} d^2;$$

$$Mg\_Ftot = 0,2991 \cdot 10^{-4} d^2;$$

$$Mg\_Rviv = 0,8383 \cdot 10^{-4} d^2;$$

$$Mg\_Lenho = 0,3080 \cdot 10^{-5} d^2 h;$$

$$Mg\_Tronc = 0,2325 \cdot 10^{-4} d^2 h;$$

$$Mg\_Total = 0,0336 + 0,9950 \cdot 10^{-5} d^2 h;$$

### **Enxofre**

$$S\_Casc = 0,2466 \cdot 10^{-6} d^2 h;$$

$$S\_Ftot = 0,7520 \cdot 10^{-5} d^2;$$

$$S\_Rviv = 0,1063 \cdot 10^{-4} d^2;$$

$$S\_Lenho = 0,1550 \cdot 10^{-5} d^2 h;$$

$$S\_Tronc = 0,4420 \cdot 10^{-5} d^2 h;$$

$$S\_Total = 0,2580 \cdot 10^{-5} d^2 h;$$

### **Boro**

$$B\_Casc = 0,3386 \cdot 10^{-3} d^2;$$

$$B\_Ftot = 0,9340 \cdot 10^{-4} d^2;$$

$$B\_Rviv = 0,6070 \cdot 10^{-3} d^2;$$

$$B\_Lenho = 0,7160 \cdot 10^{-3} d^2;$$

$$B\_Tronc = 0,00438 d^2;$$

$$B\_Total = 0,9437 \cdot 10^{-4} d^2 h;$$

### **Carbono**

$$\begin{aligned}C\_Casc &= 0,0076 (d^2 h)^{0,7880}; \\C\_Ftot &= 0,0045 d^2; \\C\_Rviv &= 0,0490 d^2; \\C\_Lenho &= 0,0138 (d^2 h)^{0,9360}; \\C\_Tronc &= 0,0342 (d^2 h)^{0,9299}; \\C\_Total &= 0,0630 d^{2,3754}.\end{aligned}$$

Seguidamente apresentam-se os modelos obtidos através do ajustamento em simultâneo com o procedimento *ITSUR*, para cada um dos minerais. Apresenta-se também a respectiva eficiência de modelação, dada pelo  $R^2$  ajustado, que é na generalidade inferior à conseguida no ajustamento em separado, mas com menor erro padrão dos coeficientes, com a garantia da aditividade das mineralomassas dos subcomponentes para a obtenção da mineralomassa total:

### **Azoto**

$$\begin{aligned}N\_Casc &= 0,5877 10^{-5} d^2 h; \\N\_Ftot &= 0,1700 10^{-3} d^2; \\N\_Rviv &= 0,2930 10^{-3} d^2; \\N\_Lenho &= 0,3660 10^{-3} d^2; \\N\_Total &\end{aligned}$$

### **$R^2$ Ajust.**

$$\begin{aligned}0,8871 \\0,7266 \\0,5437 \\0,4609 \\0,7209\end{aligned}$$

### **Fósforo**

$$\begin{aligned}P\_casc &= 0,1400 10^{-4} d^2; \\P\_Ftot &= 0,1200 10^{-4} d^2; \\P\_Rviv &= 0,3400 10^{-4} d^2; \\P\_Lenho &= 0,3800 10^{-4} d^2; \\P\_Total &\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}0,6318 \\0,6954 \\0,3639 \\0,2128 \\0,4951\end{aligned}$$

### **Potássio**

$$\begin{aligned}K\_Casc &= 0,2812 10^{-5} d^2 h; \\K\_Ftot &= 0,6600 10^{-4} d^2; \\K\_Rviv &= 0,1480 10^{-3} d^2; \\K\_Lenho &= 0,7100 10^{-4} d^2; \\K\_Total &\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}0,5853 \\0,6634 \\0,5638 \\0,0932 \\0,7427\end{aligned}$$

### **Cálcio**

$$\begin{aligned}Ca\_Casc &= 0,4730 10^{-3} d^2; \\Ca\_Ftot &= 0,2600 10^{-4} d^2; \\Ca\_Rviv &= 0,2491 10^{-3} d^2; \\Ca\_Lenho &= 0,8796 10^{-5} d^2 h; \\Ca\_Total &\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}0,2546 \\0,4772 \\0,4221 \\0,5882 \\0,7998\end{aligned}$$

### **Magnésio**

$$\begin{aligned}Mg\_Casc &= 0,4300 10^{-4} d^2; \\Mg\_Ftot &= 0,3000 10^{-4} d^2; \\Mg\_Rviv &= 0,9700 10^{-4} d^2; \\Mg\_Lenho &= 0,3100 10^{-5} d^2 h; \\Mg\_Total &\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}0,4369 \\0,7398 \\0,5323 \\0,7125 \\0,7246\end{aligned}$$

### **Enxofre**

$$\begin{aligned}S\_Casc &= 0,2441 10^{-6} d^2 h; \\S\_Ftot &= 0,7388 10^{-5} d^2; \\S\_Rviv &= 0,1100 10^{-4} d^2; \\S\_Lenho &= 0,1872 10^{-5} d^2 h; \\S\_Total &\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}0,5537 \\0,7147 \\0,6622 \\0,3827 \\0,5925\end{aligned}$$

**Boro**

$$B\_Casca = 0,3330 \cdot 10^{-3} d^2;$$

$$B\_Ftot = 0,9200 \cdot 10^{-4} d^2;$$

$$B\_Rvivo = 0,655 \cdot 10^{-3} d^2;$$

$$B\_Lenho = 0,7940 \cdot 10^{-3} d^2;$$

$$B\_Total$$

**R<sup>2</sup>Ajust.**

$$0,8000$$

$$0,5354$$

$$0,6128$$

$$0,6011$$

$$0,7830$$

**Carbono**

$$C\_Casca = 0,010008 (d^2 h)^{0,760258};$$

$$C\_Ftot = 0,004172 d^2;$$

$$C\_Rvivo = 0,041554 d^2;$$

$$C\_Lenho = 0,010784 (d^2 h)^{0,960756};$$

$$C\_Total$$

$$0,9491$$

$$0,7175$$

$$0,5124$$

$$0,9314$$

$$0,9103$$

Estes modelos estimam a mineralomassa em quilogramas (kg) com base no diâmetro a 1,30 m de altura  $d$  (cm) e na altura total  $h$  (m), excepto o boro, o qual é estimado em gramas (g) por apresentar concentrações muito baixas.

**5.3.3. Biomassa e mineralomassa aérea dos povoamentos**

As equações de biomassa seleccionadas no ponto 5.3.1. foram utilizadas para estimar a biomassa total e por componentes das árvores individuais nos povoamentos em estudo da Padrela, Marão e Bornes. Esta estimativa foi realizada com as equações provenientes do ajustamento em simultâneo uma vez que os erros padrões dos coeficientes diminuíram e porque desta forma se garante a aditividade entre os diferentes componentes para obtenção da biomassa total. A biomassa das parcelas de área conhecida corresponde ao somatório das biomassas individuais das árvores que as constituem.

A biomassa aérea dos povoamentos estudados, total e por componentes, é apresentada no Quadro 5.10. O povoamento da Padrela é o povoamento mais velho (65 anos) apresentando árvores nas classes de diâmetro de maior dimensão, relativamente aos outros dois povoamentos. Apesar disso possui, em 2001, uma biomassa total e por componentes bastante inferior aos restantes, devido à sua menor densidade.

Quadro 5.10: Biomassa aérea, total e por componentes, dos povoamentos estudados.

Componente	Biomassa aérea estimada através de equações compatíveis, por povoamento					
	Bornes (N=1227 árv ha <sup>-1</sup> )		Marão (N=485 árv ha <sup>-1</sup> )		Padrela (N=259 árv ha <sup>-1</sup> )	
	Mg ha <sup>-1</sup>	%	Mg ha <sup>-1</sup>	%	Mg ha <sup>-1</sup>	%
Lenho	268,2	70,4	301,3	69,7	139,0	69,3
Casca	31,0	8,1	31,7	7,4	15,6	7,8
Total tronco	299,2	78,5	333,0	77,1	154,6	77,1
Ramos	76,0	19,9	91,9	21,3	43,0	21,4
Folhas+Flores	5,7	1,5	7,0	1,6	3,2	1,6
Total copa	81,7	21,5	98,9	22,9	46,2	22,9
Total árvore	380,9	100	431,9	100	200,8	100

N, densidade média dos povoamentos.

Em termos de contributo, em percentagem, para a biomassa total de cada um dos componentes considerados, não se verifica uma grande discrepância entre os três povoamentos. Bornes apresenta uma maior percentagem de casca porque possui uma menor proporção de lenho distribuída por um maior número de árvores de menores dimensões.

A biomassa do lenho predomina tanto ao nível do tronco como ao nível geral, contribuindo com cerca de 70 % da matéria seca aérea. Os ramos são responsáveis por 20 % a 21 %, logo seguidos da casca, com 7 % a 8 % do total e das folhas e flores com apenas 1,5 %, aproximadamente. Assim, 77 % a 78 % da biomassa aérea total do castanheiro em alto fuste é proveniente do tronco principal enquanto 21,5 % a 23 % resultam da copa.

No que se refere à estimação do teor de elementos minerais dos diferentes compartimentos da árvore podemos empregar dois processos distintos:

- a. A utilização das equações de mineralomassa apresentadas na secção 5.3.2.;
- b. A utilização das equações de biomassa apresentadas no ponto 5.3.1. para estimação da biomassa dos diferentes componentes e multiplicar o valor obtido pela concentração média de cada mineral nos respectivos compartimentos, apresentada na secção 5.2.3., Quadro 5.3.

Da mesma forma que para a biomassa, a mineralomassa das parcelas de área conhecida corresponde ao somatório das mineralomassas individuais das árvores que as constituem.

No Quadro 5.11 é apresentada a mineralomassa aérea dos povoamentos estudados, total e por componentes, pelos dois processos atrás referidos. No método 1 são usadas as equações de mineralomassa obtidas com ajustamento simultâneo (*ITSUR*). No método 2 a biomassa estimada com as equações de biomassa ajustadas em simultâneo (secção 5.3.1.) é multiplicada pela concentração média de cada mineral no respectivo componente. A estimativa da mineralomassa total da árvore estimada pelo método 2 é na maioria dos casos superior ao valor obtido pelo método 1, embora sejam da mesma ordem de grandeza. Para as folhas o método 2 estima na maioria das situações valores inferiores ao método 1.

Quadro 5.11: Mineralomassa aérea, total e por componentes, dos povoamentos estudados obtida através das equações compatíveis de mineralomassa e biomassa.

Componente	Método	N	P	K	Ca	Mg	S	B*	C**
		Bornes			N=1227 árv ha <sup>-1</sup>				
Lenho	Mét. 1 (kg ha <sup>-1</sup> )	292,0	30,3	56,6	152,0	53,6	32,4	597,6	127,0
	(%)	38,3	38,8	20,5	20,3	28,3	63,1	40,9	70,4
	Mét. 2 (kg ha <sup>-1</sup> )	287,0	32,2	83,1	147,5	61,7	32,2	611,6	129,8
	(%)	38,3	39,1	27,7	18,0	29,4	62,2	40,4	69,8
Casca	Mét. 1 (kg ha <sup>-1</sup> )	101,6	11,2	48,6	377,4	34,3	4,2	265,7	16,8
	(%)	13,3	14,3	17,6	50,4	18,1	8,2	18,2	9,3
	Mét. 2 (kg ha <sup>-1</sup> )	129,6	11,5	53,3	408,0	49,0	5,3	303,9	16,4
	(%)	17,3	13,9	17,8	49,8	23,4	10,2	20,1	8,8
Total tronco	Mét. 1 (kg ha <sup>-1</sup> )	393,6	41,5	105,2	529,4	87,9	36,6	863,3	143,7
	(%)	51,6	53,1	38,1	70,7	46,4	71,4	59,1	79,7
	Mét. 2 (kg ha <sup>-1</sup> )	416,6	43,7	136,5	556,6	110,7	37,5	915,4	146,2
	(%)	55,7	53,1	45,5	67,7	52,8	72,4	60,5	78,7
Ramos vivos	Mét. 1 (kg ha <sup>-1</sup> )	233,8	27,1	118,1	198,7	77,4	8,8	522,6	33,1
	(%)	30,6	34,7	42,8	26,5	40,9	17,1	35,8	18,4
	Mét. 2 (kg ha <sup>-1</sup> )	215,9	29,6	122,4	244,8	78,3	9,1	529,1	36,7
	(%)	28,8	36,0	40,8	29,8	37,4	17,6	34,9	19,8
Folhas+Flores	Mét. 1 (kg ha <sup>-1</sup> )	135,6	9,6	52,6	20,7	23,9	5,9	73,4	3,3
	(%)	17,8	12,2	19,1	2,8	12,6	11,5	5,0	1,8
	Mét. 2 (kg ha <sup>-1</sup> )	115,7	8,9	41,1	19,6	20,5	5,1	69,1	2,9
	(%)	15,5	10,8	13,7	2,4	9,8	9,9	4,6	1,6
Total copa	Mét. 1 (kg ha <sup>-1</sup> )	369,4	36,7	170,7	219,4	101,3	14,7	596,0	36,4
	(%)	48,4	46,9	61,9	29,3	53,5	28,6	40,8	20,1
	Mét. 2 (kg ha <sup>-1</sup> )	331,6	38,6	163,6	264,4	98,8	14,2	598,3	39,7
	(%)	44,3	46,9	54,5	32,2	47,2	27,5	39,5	21,3
Total árvore	Mét. 1 (kg ha <sup>-1</sup> )	763,0	78,2	276,0	748,9	189,2	51,2	1459,3	180,2
	(%)	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	Mét. 2(kg ha <sup>-1</sup> )	748,2	82,2	300,0	820,0	209,5	51,7	1513,8	185,9
	(%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
		Marão			N=485 árv ha <sup>-1</sup>				
Lenho	Mét. 1 (kg ha <sup>-1</sup> )	318,9	33,1	61,9	183,9	64,8	39,1	652,7	148,3
	(%)	37,7	38,8	20,1	22,0	30,4	64,9	40,9	72,5
	Mét. 2 (kg ha <sup>-1</sup> )	322,3	36,1	93,4	165,7	69,3	36,1	686,8	145,8
	(%)	37,6	38,2	27,0	18,3	29,0	61,5	39,9	69,2
Casca	Mét. 1 (kg ha <sup>-1</sup> )	122,9	12,2	58,8	412,2	37,5	5,1	290,2	16,3
	(%)	14,5	14,3	19,1	49,3	17,6	8,5	18,2	8,0
	Mét. 2 (kg ha <sup>-1</sup> )	132,7	11,7	54,6	417,8	50,2	5,4	311,1	16,8
	(%)	15,5	12,4	15,8	46,2	21,0	9,2	18,1	8,0
Total tronco	Mét. 1 (kg ha <sup>-1</sup> )	441,8	45,3	120,7	596,1	102,3	44,2	942,9	164,6
	(%)	52,3	53,1	39,3	71,3	48,0	73,4	59,1	80,5
	Mét. 2 (kg ha <sup>-1</sup> )	455,0	47,9	148,0	583,5	119,4	41,5	997,9	162,6
	(%)	53,1	50,6	42,8	64,6	50,0	70,7	58,0	17,2
Ramos vivos	Mét. 1 (kg ha <sup>-1</sup> )	255,3	29,6	129,0	217,1	84,5	9,6	570,8	36,2
	(%)	30,2	34,7	42,0	26,0	39,7	15,9	35,8	17,7
	Mét. 2 (kg ha <sup>-1</sup> )	261,2	35,9	148,0	296,1	94,7	11,0	640,0	44,4
	(%)	30,5	37,9	42,8	32,8	39,6	18,8	37,2	21,1
Folhas+Flores	Mét. 1 (kg ha <sup>-1</sup> )	148,1	10,4	57,5	22,6	26,1	6,4	80,2	3,6
	(%)	17,5	12,2	18,7	2,7	12,3	10,7	5,0	1,8
	Mét. 2 (kg ha <sup>-1</sup> )	139,9	10,8	49,8	23,7	24,8	6,2	83,7	3,5
	(%)	16,3	11,4	14,4	2,6	10,4	10,5	4,9	1,7
Total copa	Mét. 1 (kg ha <sup>-1</sup> )	403,4	40,0	186,5	239,7	110,6	16,0	651,0	39,8
	(%)	47,7	46,9	60,7	28,7	52,0	26,6	40,8	19,5
	Mét. 2 (kg ha <sup>-1</sup> )	401,1	46,6	197,8	319,8	119,6	17,2	723,7	48,0
	(%)	48,8	49,3	57,2	35,4	50,0	29,3	42,0	22,8
Total árvore	Mét. 1 (kg ha <sup>-1</sup> )	845,3	85,4	307,1	835,8	213,0	60,3	1593,8	204,5
	(%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	Mét. 2(kg ha <sup>-1</sup> )	856,1	94,5	345,8	903,2	239,0	58,8	1721,6	210,6
	(%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

N, densidade média dos povoamentos. \* Mineralomassa em g ha<sup>-1</sup>; \*\* Mineralomassa em Mg ha<sup>-1</sup>.

Quadro 5.11 (continuação): Mineralomassa aérea, total e por componentes, dos povoamentos estudados obtida através das equações compatíveis de mineralomassa e biomassa.

Componente	Método	N	P	K	Ca	Mg	S	B*	C**
		Padrela			N=259 árv ha <sup>-1</sup>				
Lenho	Mét. 1 (kg ha <sup>-1</sup> )	157,3	16,3	30,5	86,0	30,3	18,3	322,0	71,8
	(%)	38,0	38,8	20,3	21,1	29,3	64,0	40,9	72,4
	Mét. 2 (kg ha <sup>-1</sup> )	148,7	16,7	43,1	76,4	32,0	16,7	316,8	67,2
	(%)	37,0	37,7	26,5	17,7	28,4	60,9	39,2	68,6
Casca	Mét. 1 (kg ha <sup>-1</sup> )	57,5	6,0	27,5	203,3	18,5	2,4	143,1	7,6
	(%)	13,9	14,3	18,3	49,9	17,9	8,3	18,2	7,7
	Mét. 2 (kg ha <sup>-1</sup> )	65,1	5,8	26,8	205,1	24,6	2,6	152,8	8,3
	(%)	16,2	13,3	16,5	47,6	21,9	9,7	18,9	8,4
Total tronco	Mét. 1 (kg ha <sup>-1</sup> )	214,8	22,3	58,0	289,4	48,8	20,7	465,1	79,5
	(%)	51,9	53,1	38,7	71,0	47,2	72,4	59,1	80,2
	Mét. 2 (kg ha <sup>-1</sup> )	213,8	22,4	69,9	281,6	56,6	19,3	469,6	75,7
	(%)	53,3	50,7	43,0	65,3	50,3	70,6	58,1	77,1
Ramos vivos	Mét. 1 (kg ha <sup>-1</sup> )	125,9	14,6	63,6	107,1	41,7	4,7	281,6	17,9
	(%)	30,4	34,7	42,4	26,3	40,3	16,5	35,8	18,0
	Mét. 2 (kg ha <sup>-1</sup> )	122,1	16,8	69,3	138,5	44,3	5,2	299,5	20,8
	(%)	30,4	37,9	42,6	32,1	39,4	18,8	37,0	21,2
Folhas+Flores	Mét. 1 (kg ha <sup>-1</sup> )	73,1	5,1	28,4	11,2	12,9	3,2	39,5	1,8
	(%)	17,6	12,2	18,9	2,7	12,5	11,1	5,0	1,8
	Mét. 2 (kg ha <sup>-1</sup> )	65,5	5,0	23,3	11,1	11,6	2,9	39,1	1,6
	(%)	16,3	11,4	14,3	2,6	10,3	10,6	4,8	1,7
Total copa	Mét. 1 (kg ha <sup>-1</sup> )	199,0	19,7	92,0	118,3	54,6	7,9	321,1	19,7
	(%)	48,0	46,9	61,3	37,4	52,8	27,6	40,8	19,8
	Mét. 2 (kg ha <sup>-1</sup> )	187,7	21,8	92,6	149,6	55,9	8,1	338,6	22,4
	(%)	46,7	49,3	57,0	34,7	49,7	29,4	41,9	22,9
Total árvore	Mét. 1 (kg ha <sup>-1</sup> )	413,9	42,1	150,0	407,6	103,4	28,6	786,2	99,1
	(%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	Mét. 2(kg ha <sup>-1</sup> )	401,5	44,3	162,4	431,2	112,5	27,4	808,2	98,0
	(%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

N, densidade média do povoamento. \* Mineralomassa em g ha<sup>-1</sup>; \*\* Mineralomassa em Mg ha<sup>-1</sup>.

Os resultados obtidos não foram comparados com outros estudos uma vez que não se encontrou, na pesquisa bibliográfica realizada, qualquer outro estudo deste género para o castanheiro em alto fuste adulto. Os poucos estudos encontrados para a espécie, como já se referiu, referem-se aos soutos e ao regime de talhadia com idades e densidades bastante diferentes, além de não tão pormenorizados na divisão da biomassa nos seus componentes.

No que se refere aos elementos (N, P, K, Ca, Mg, S e B) a sua concentração varia com o componente e mineral considerado. Por outro lado, a distribuição da biomassa por componentes difere nitidamente da distribuição da mineralomassa. Por exemplo, se a contribuição da biomassa do lenho para a biomassa aérea total é cerca de 70 %, a sua contribuição para a mineralomassa aérea total não excede os 41 %, à excepção do enxofre que apresenta valores superiores. No oposto, a contribuição das folhas e flores para a mineralomassa total pode atingir os 19 % enquanto que o seu contributo para a biomassa total não excede 1,6 %. Da mesma forma, a casca contribui

com 9 a 10 %, no máximo, para a biomassa do tronco e em contrapartida pode ser responsável por cerca de 70 % da mineralomassa do tronco, no caso do cálcio. Relativamente à análise da concentração média dos elementos minerais nos diferentes componentes da biomassa poderemos individualizar um grupo constituído pelo azoto, fósforo e potássio com padrões de distribuição semelhantes como se pode ver na Figura 5.8.

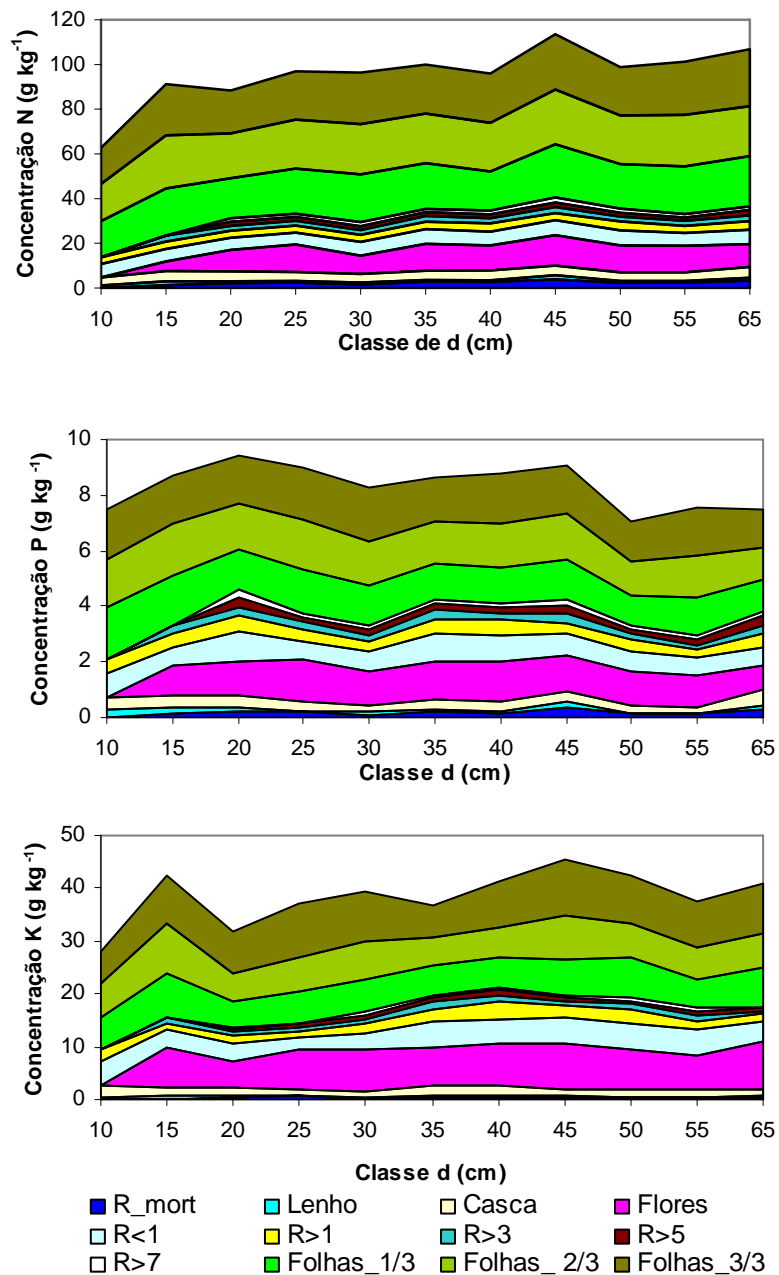


Figura 5.8: Concentração média dos elementos  $N$ ,  $P$  e  $K$  por categorias de biomassa consideradas e por classe de diâmetro.

Como se pode observar na Figura 5.8 as maiores concentrações de  $N$ ,  $P$  e  $K$  encontram-se nas folhas, flores e ramos de diâmetro inferior a  $1\text{ cm}$ .

Um outro grupo é constituído pelo cálcio com um padrão de distribuição diferente dos restantes como se pode ver na Figura 5.9.

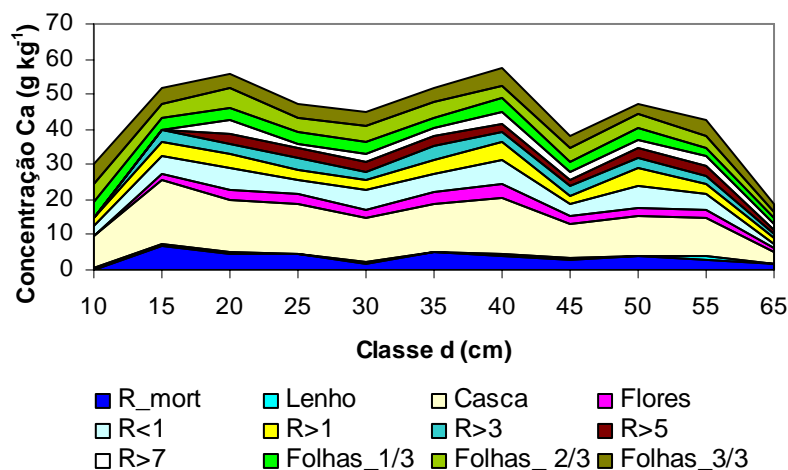


Figura 5.9: Concentração média do cálcio por categorias de biomassa consideradas e por classe de diâmetro.

O cálcio encontra-se em maior quantidade na casca relativamente aos restantes componentes da biomassa os quais apresentam uma distribuição mais próxima uns dos outros.

O magnésio apresenta uma distribuição próxima do primeiro grupo considerado, com maior concentração nas folhas e flores, mas com um valor mais elevado no que se refere à casca, como se pode ver na Figura 5.10.

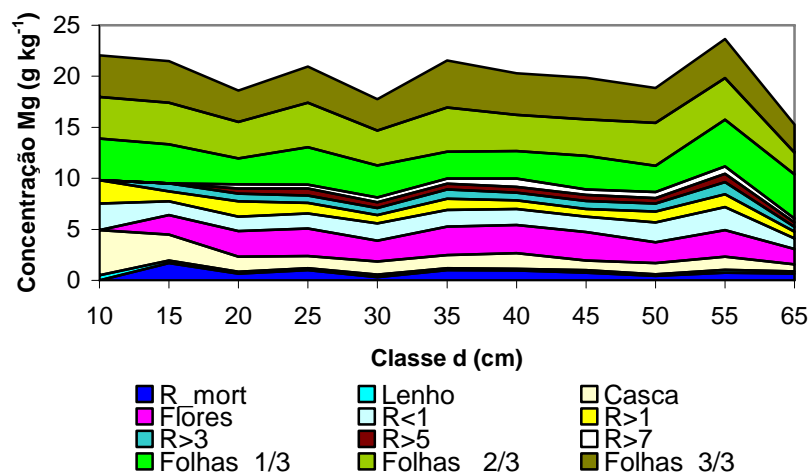


Figura 5.10: Concentração média do magnésio por categorias de biomassa consideradas e por classes de diâmetro.

O boro apresenta uma distribuição pelos diferentes componentes da biomassa bastante equilibrada embora com maiores concentrações na casca, seguida das folhas, flores, ramos menores até aos maiores e depois o lenho com uma concentração muito reduzida como se pode ver na Figura 5.11.

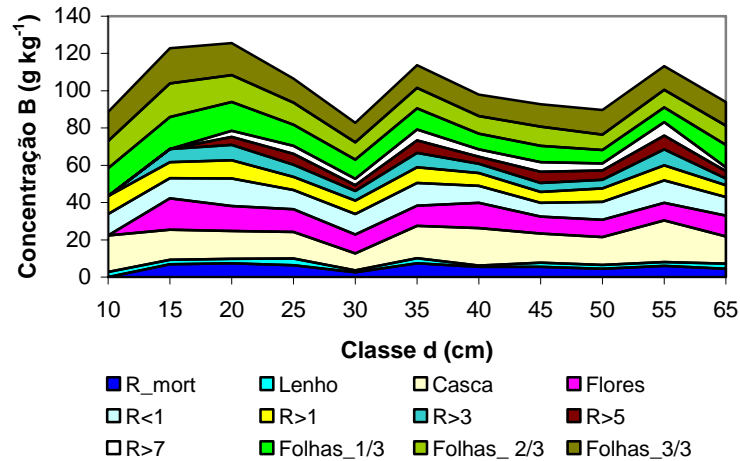


Figura 5.11: Concentração média de boro por categorias de biomassa consideradas e por classes de diâmetro.

O enxofre tem um comportamento semelhante ao azoto concentrando-se sobretudo nas folhas. Contudo verifica-se uma maior concentração nos ramos com diâmetro superior a 7 cm mantendo-se a desproporcionalidade na concentração média observada nas folhas relativamente aos restantes componentes, como se pode ver na Figura 5.12.

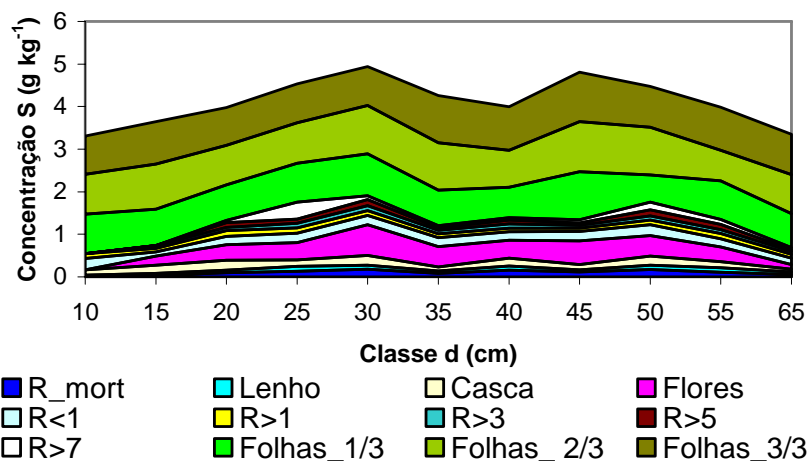


Figura 5.12: Concentração média de enxofre por categorias de biomassa consideradas e por classes de diâmetro.

Relativamente ao carbono verifica-se que a sua distribuição é idêntica para todos os componentes da biomassa (Figura 5.13). Os menores valores observados nas classes de diâmetro mais baixas devem-se à falta de algum dos componentes ou subcomponentes considerados, nomeadamente as flores, inexistentes nas árvores dominadas que constituem estas categorias.

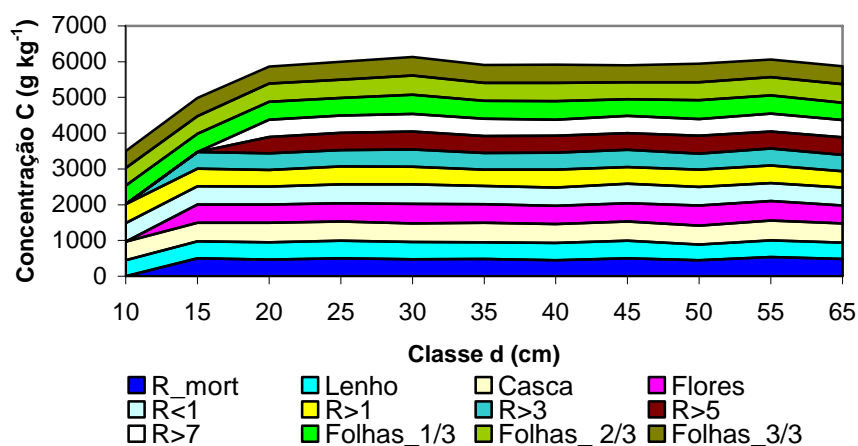


Figura 5.13: Concentração média de carbono por categorias de biomassa consideradas e por classes de diâmetro.

Da análise das figuras apresentadas verifica-se que a concentração de minerais nas folhas é idêntica para os três níveis considerados, com valores ligeiramente superiores para o potássio e cálcio no estrato inferior da copa (*Folhas\_3/3*), provavelmente por ser constituído por folhas mais velhas.

#### 5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As folhas, flores, cascas e raminhos são os componentes da biomassa onde a concentração dos elementos minerais é mais elevada. Contudo, o teor em minerais de cada um destes componentes, embora importante, é inferior ao do tronco, devido ao seu reduzido peso na biomassa total.

Ao longo deste capítulo desenvolveram-se modelos que permitem estimar a biomassa e a mineralomassa acima do solo dos povoamentos de alto fuste de castanheiro. Estas equações são importantes para avaliar a biomassa produzida, mas também para a gestão sustentada dos povoamentos, na medida em que se poderá estimar a mineralomassa exportada através dos cortes ou restituída ao ecossistema através dos

resíduos da exploração. A comparação entre os elementos armazenados na copa e imobilizados no tronco merece uma atenção particular no momento da exploração e tratamentos silvícolas uma vez que uma parte considerável da mineralomassa se encontra na copa. Por este facto dever-se-á privilegiar a exploração tradicional com exportação apenas do tronco principal que acarreta menores perdas para o ecossistema. Este estudo faz parte de uma investigação mais alargada que se estenderá também à fracção orgânica e inorgânica do solo. Tem como objectivo a obtenção de conhecimentos para a gestão sustentável dos povoamentos de castanheiro de forma a adequar as intervenções silvícolas que, como se sabe, podem influenciar o balanço em elementos minerais do solo, afectando os fluxos de entradas e saídas do sistema, ou modificar directamente o armazenamento de elementos no solo.

Conjuntamente desenvolveram-se equações para predição do carbono sequestrado nas árvores, importantes para avaliar a contribuição da mudança nas florestas para o ciclo de carbono global. Estas equações permitem também determinar as quantidades de carbono em cada um dos seus componentes e representar a quantidade de carbono potencial que pode ser libertada para a atmosfera, ou conservada e fixada numa determinada área.

Paralelamente ao estudo da biomassa e mineralomassa desenvolveram-se equações percentuais de biomassa para o tronco principal que permitem estimar o peso seco do tronco com diâmetros e alturas de despona variáveis:

*Biomassa percentual do tronco em função de di:*

$$R = 1 - 0,4111 \text{ di}^{3,1655} / (\text{d}^{3,1798} \text{ h}^{-0,2528}) \quad EM=0,9832$$

*Biomassa percentual do lenho em função de di:*

$$R = 1 - 0,3863 \text{ di}_{sc}^{3,1493} / (\text{d}_{sc}^{3,1390} \text{ h}^{-0,2425}) \quad EM=0,9827$$

$$R = 1 - 0,3969 \text{ di}^{3,2366} / (\text{d}^{3,2471} \text{ h}^{-0,2578}) \quad EM=0,9830$$

*Biomassa percentual do tronco em função de hi:*

$$R = 1 - (0,9313 \text{ (h-hi)}^{2,3475} / \text{h}^{2,3228}) \quad EM=0,9897$$

*Biomassa percentual do lenho em função de hi:*

$$R = 1 - (0,9210 \text{ (h-hi)}^{2,3980} / \text{h}^{2,3707}) \quad EM=0,9704$$

Estas equações permitem estimar a percentagem da biomassa do tronco, com ou sem casca, a partir do diâmetro à altura do peito  $d$  (cm), do diâmetro mercantil  $di$  (cm) e

da altura total da árvore  $h$  (m), ou ainda estimar a percentagem da biomassa do tronco a partir da altura total  $h$  e da altura de despona  $hi$  (m).

A estimação da biomassa total aérea deverá ser efectuada com base no modelo formado pela combinação dos submodelos dos diferentes componentes da árvore, para garantir a sua aditividade:

$$\begin{cases} W_{Ftot} = 0,00033 d^2 h \\ W_{Rviv} = 0,00440 d^2 h \\ W_{Casca} = 0,06574 d^{1,84096} \\ W_{Lenho} = 0,02044 d^{1,76603} h^{1,16402} \\ W_{tot} = 0,00033 d^2 h + 0,00440 d^2 h + 0,06574 d^{1,84096} + 0,02044 d^{1,76603} h^{1,16402} \end{cases}$$

Estas equações estimam a biomassa dos diferentes componentes (em kg), com base no diâmetro a 1,30 m  $d$  com casca (cm) e na altura total  $h$  (m).

## CAPÍTULO VI

### MODELAÇÃO DO CRESCIMENTO EM DIÂMETRO DA ÁRVORE INDIVIDUAL

Segundo Munro (1974) os modelos de produção podem ser classificados em modelos de povoamento e modelos de árvore individual de acordo com a unidade primária de simulação utilizada, povoamento ou árvore, respectivamente. Referir-nos-emos, neste ponto, concretamente aos modelos de árvore individual uma vez que o nosso objectivo é a obtenção de um modelo de crescimento em diâmetro do tipo *crescimento potencial x função modificadora*.

#### 6.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

##### **6.1.1. Modelos de árvore individual**

Os modelos de crescimento e produção individuais são especialmente úteis para a gestão florestal, uma vez que são capazes de simular uma larga variedade de actividades de gestão, particularmente de desbastes (Cao *et al.*, 2002).

Os modelos de árvore permitem modelar os povoamentos com qualquer tipo de distribuição de diâmetros, obtendo-se uma precisão igual ou superior à conseguida com o recurso à modelação das distribuições de diâmetros, estando estas restringidas a povoamentos que sigam uma distribuição de diâmetros “modelável” com uma função densidade de probabilidade.

A modelação do crescimento em diâmetro da árvore individual é uma das componentes mais importantes de um modelo de árvore. A sua importância reside na elevada correlação que manifesta com as variáveis das restantes componentes do crescimento da árvore, facilidade de obtenção e precisão conseguidas. O diâmetro é sensível às mudanças ambientais e de densidade do povoamento, apresenta *p. e.* uma boa correlação com a dimensão da copa, a biomassa ou o volume do tronco e é registado constantemente em camadas anuais, pelo menos nas zonas temperadas, o que facilita muito a recolha de dados (Zeide, 1989). Duma maneira geral os esquemas de medição previstos para as parcelas de estudo do crescimento, permanentes ou de inventário, incluem a sua medição em todas as árvores, contrariamente a outras variáveis como a altura total ou o diâmetro das copas, medidas muitas vezes apenas nas árvores modelo (Tomé, 1988) que nem sempre se mantêm entre medições sucessivas.

Por este facto a modelação do crescimento da árvore individual restringe-se muitas vezes à modelação do crescimento em diâmetro, obtendo-se as outras variáveis através de relações com o diâmetro por meio de regressão (Tomé, 1988).

Normalmente, os modelos de crescimento com base na árvore incluem modelos de árvore individual de crescimento em diâmetro, de crescimento em altura, de crescimento em volume e mortalidade, entre outros, como submodelos. O crescimento em altura pode ser modelado com base no crescimento em altura potencial obtido através das árvores dominantes que traduzem o potencial de crescimento, ou em árvores de igual dimensão que se desenvolvem na ausência de competição, sendo por isso necessário um submodelo de crescimento em altura dominante. Contudo, o submodelo para a predição do crescimento em altura pode ser substituído por uma função hipsométrica que permita estimar o crescimento em altura tendo por base o submodelo do crescimento em diâmetro.

Os modelos de árvore de crescimento e produção podem ser dependentes ou independentes da distância, de acordo com o índice de competição que incorporam. Os índices de competição são uma tentativa de quantificar numa equação matemática o efeito das árvores vizinhas (competição intra-específica), ou outras plantas (competição inter-específica), no crescimento individual das árvores de um povoamento. Os modelos independentes da distância projectam geralmente o crescimento da árvore em função de variáveis que traduzem a sua dimensão actual e de variáveis do povoamento (Cao *et al.*, 2002), sem informação da sua localização, enquanto os modelos dependentes da distância, incluem, de algum modo, o número e dimensões das árvores circundantes, os vizinhos, bem como informação relativa à sua distribuição espacial no povoamento.

Os índices de competição têm sido usados em modelos de simulação do crescimento da árvore individual para descrever a variabilidade no crescimento e a mortalidade atribuída à competição com as árvores vizinhas (Daniels, 1976).

Ao longo dos tempos têm sido propostos variados índices de competição na tentativa de aumentar a precisão das predições de crescimento. Descrições detalhadas dos vários índices podem ser encontradas em diversos trabalhos (*p. e.* Spurr, 1962; Daniels, 1976; Alemdag, 1978; Oliveira, 1980; Curtis, 1982; Lorimer, 1983; Martin e Ek, 1984; Daniels *et al.*, 1986; Tomé e Burkhardt, 1989; Hix e Lorimer, 1990; Tomé, 1988, 1990a; Biging e Dobbertin, 1992; Soares e Tomé, 1999). Uma descrição dos principais índices dependentes e independentes da distância, aplicados ao castanheiro, embora em regime de talhadia, pode ser encontrada em Patrício (1996).

Os índices de competição independentes da distância não necessitam, como já se disse, de coordenadas das árvores e são função de variáveis do povoamento e ou de dimensões da árvore individual. Exemplos deste tipo de índices aplicados com sucesso são a área basal por hectare (Martin e Ek, 1984), funções da área basal por hectare (Walsh, 1986), razão de dimensões das árvores e dos seus valores médios no povoamento (Grover e Hool, 1979; Daniels *et al.*, 1986) e a área basal de árvores maiores que a árvore central (Trasobares *et al.*, 2004).

Segundo Oliveira (1980) os índices independentes da distância não têm em consideração o estatuto de cada árvore e por isso as suas conclusões são iguais para as árvores que num mesmo povoamento, tenham a mesma dimensão.

Vários estudos (*p. e.* Daniels, 1976; Alemdag, 1978; Lorimer, 1983; Martin e Ek, 1984; Daniels *et al.*, 1986; Tomé e Burkhart, 1989; Tomé, 1998 e 1990a; Biging e Dobbertin, 1995; Wimberly e Bare, 1996; Carvalho, 1999) demonstraram que o contributo para a explicação do crescimento dos índices dependentes e independentes da distância não é substancialmente diferente. Para além disso uma conclusão frequente é o facto de não se evidenciar nenhum índice que seja consistentemente superior aos outros. Alguns índices têm melhor prestação com determinadas espécies, em situações específicas (Biging e Dobbertin, 1992), no entanto, o índice com melhor comportamento num determinado conjunto de dados pode aparecer como muito pouco eficiente noutras casos (Tomé, 1990a).

#### **6.1.1.1. Classificação dos modelos**

Os modelos usados na modelação do crescimento em diâmetro podem ser classificados segundo a designação de Harrison (1984), como empíricos e analíticos, estes últimos também designados de base biológica, ou empíricos e teóricos segundo Amateis (1994) ou ainda como empíricos, teóricos e probabilísticos de acordo com a classificação utilizada por Vanclay (1994).

Os modelos empíricos são funções matemáticas que expressam o crescimento observado, mas sem qualquer hipótese associada de causa-efeito do fenómeno estudado (Vanclay, 1994). Estes modelos não permitem testar a relação teórica que se pense existir no sistema que está a ser modelado. No entanto, podem e devem ser formulados para se comportarem de uma forma realista quando aplicados em diversas estações e condições dos povoamentos. Infelizmente o termo “modelo empírico” evoca a imagem

de um método “rápido e pouco rigoroso” o que não se aplica (Burkhart, 1997). Segundo o autor os modelos empíricos não são necessariamente menos criativos, científicos, elegantes ou intelectualmente menos exigentes do que outras perspectivas de modelação mais abstractas, contudo os objectivos do esforço de modelação e do nível de compreensão do fenómeno que se pretende modelar pode ditar uma aproximação empírica. Na realidade são modelos práticos úteis para descrever situações do mundo real. São geralmente desenvolvidos com base na análise da correlação entre variáveis da amostra de dados da população de interesse, seguida da aplicação de procedimentos estatísticos, geralmente regressão, para estimar os parâmetros dos modelos (Amateis, 1994). Desta forma relacionam no caso concreto o acréscimo corrente em diâmetro ou em área seccional com características iniciais da árvore e do respectivo povoamento. Estas equações podem ser úteis para projecções futuras mas, geralmente, contribuem pouco para a compreensão da dinâmica dos povoamentos, apresentando muitas vezes previsões irrealistas quando se fazem extrapolações para além do intervalo de dados usado na sua construção. Contudo, as funções empíricas podem ser formuladas para proporcionarem estimativas biologicamente realistas, ao longo de uma grande série de dados (Wykoff, 1990), podendo mesmo proporcionar melhores estimativas que as funções teóricas (Martin e Ek, 1984). Apesar disso, qualquer equação que viole os princípios biológicos deve ser rejeitada, mesmo que esta proporcione predições eficientes para um determinado conjunto de dados (Hamilton, 1990). Estes modelos não estão ligados às causas da produtividade, o que constitui talvez a sua principal desvantagem, sobretudo quando se pretendem avaliar questões da sustentabilidade na gestão florestal. São ambientalmente estáticos e por isso não podem ser extrapolados para um novo conjunto de condições limites como as que as mudanças climáticas podem impor (Schwalm e Ek, 2001).

Segundo Zeide (1990), as equações de crescimento devem possuir uma assíntota superior para expressar o facto de que qualquer crescimento é limitado. Segundo este autor o crescimento não assintótico é sempre temporário podendo ser expresso por um segmento de um modelo assintótico.

As funções teóricas, por outro lado, são baseadas nas leis que governam o processo que está a ser modelado, neste caso o crescimento em diâmetro. Este tipo de modelos é muitas vezes caracterizado por parâmetros com algum significado físico ou biológico relacionado com as leis ou princípios dos quais derivam (Amateis, 1994). Segundo o autor estes modelos são muitas vezes mais difíceis de desenvolver devido às

leis ou princípios fundamentais que lhes estão subjacentes serem geralmente complexas e obscuras.

Nos modelos probabilísticos de acréscimo em diâmetro a probabilidade para que uma determinada árvore complete um centímetro de crescimento num determinado ano pode ser estimada igualmente a partir da dimensão da árvore, da competição e factores da estação.

A modelação tradicional do crescimento e produção tem procurado combinar certos aspectos das funções empíricas e teóricas, ou de base biológica, e desenvolver modelos que utilizem o poder de cada uma (Amateis, 1994).

#### **6.1.1.2. Modelação do acréscimo em diâmetro**

Os modelos de acréscimo em diâmetro da árvore individual estimam o crescimento periódico em diâmetro de cada árvore do povoamento individualmente. Segundo Huang e Titus (1995) estes modelos são componentes básicas e essenciais de modelos de crescimento e produção de árvores individuais como *PTAEDA* (Daniels e Burkhardt, 1975), *SPS* (Arney, 1985), *ORGANON* (Hester *et al.*, 1989), *FOREST* (Ek e Monserud, 1974), *STEMS* (Belcher *et al.*, 1982) e *PROGNOSIS* (Stage, 1973; Wykoff *et al.*, 1982; Wykoff, 1990). Para modelar o acréscimo em diâmetro são geralmente usados dois processos. Um é independente do potencial de crescimento no qual o acréscimo em diâmetro é expresso directamente em função de características da árvore e do povoamento, incluindo medidas que traduzem a competição entre árvores (Wykoff *et al.*, 1982; Martin e Ek, 1984; Wykoff, 1990); O outro é dependente do potencial de crescimento, no qual a função que define o crescimento em diâmetro potencial das árvores livres de competição é primeiramente seleccionada, e só depois é definido o factor de ajustamento da competição (função modificadora) que é aplicado para reduzir este potencial (Ek e Monserud, 1974; Daniels e Burkhardt, 1975). De acordo com Huang e Titus (1995) o segundo ponto muitas vezes envolve a selecção de uma função do acréscimo em diâmetro potencial e acentua a forma como a função modificadora é modelada e como ela afecta o acréscimo em diâmetro potencial. Wykoff (1990) considera que ambos os processos podem produzir predições aceitáveis, a opção por um ou por outro pode simplesmente ter a ver com a preferência ou conveniência do modelador.

As variáveis utilizadas para a modelação do acréscimo em diâmetro podem ser tanto o acréscimo em diâmetro como o acréscimo em área seccional (Vanclay, 1994; Huang e Titus, 1995). West (1980) refere que a precisão das estimativas para os diâmetros futuros é virtualmente a mesma quer se usem equações de acréscimo em diâmetro ou em área seccional para a sua predição. Os argumentos a favor da modelação do acréscimo em área seccional relacionam-se sobretudo com a suposta maior proximidade desta variável do crescimento em volume (*p. e.* Hökkä e Groot, 1999), relativamente ao acréscimo em diâmetro, e com os maiores valores do coeficiente de determinação. No entanto Vanclay (1994), para além de considerar infundados os argumentos apresentados, encara este último justificativo como inválido na medida em que a comparação com base no coeficiente de determinação não é legítima, dado que a variável dependente ( e portanto a *SQR*) não é a mesma nos dois casos. Os acréscimos em diâmetro e em área basal estão relacionados matematicamente podendo uma variável transformar-se na outra pelo que a diferença aparente nas medidas da qualidade do ajustamento poderá estar relacionada com as diferenças na estrutura do erro e na relação funcional implícita, mais do que com a superioridade de um modelo em relação ao outro (Vanclay, 1994, 1995).

O segundo procedimento descrito anteriormente tem tido uma grande aceitação, consiste, relembramos, em predizer o crescimento a partir de uma função de crescimento potencial e em usar uma função modificadora para estimar os acréscimos actuais:

$$\text{Crescimento} = \text{Crescimento potencial} \times \text{Função modificadora.}$$

Segundo Quicke *et al.* (1994) a função de crescimento potencial representa o máximo crescimento atingível para uma árvore, enquanto a função modificadora, assumindo um valor geralmente entre 0 e 1, representa os desvios relativamente ao seu potencial devidos à competição. Para tal é necessário definir a população de árvores que representam o crescimento potencial. A definição desta população varia desde as árvores isoladas (Amateis e Burkhart, 1989) até a algumas proporções de árvores de crescimento mais rápido presentes nos dados. Na ausência de árvores isoladas têm sido usadas, por diversos autores, as árvores dominantes para a modelação do crescimento potencial. Assim, Teck e Hilt (1991) consideram 10 % das árvores dominantes dos diferentes grupos obtidos da divisão dos dados de acordo com várias combinações de diâmetro e classe de qualidade. Shifley (1987) baseou a sua função potencial em 5 % das árvores com mais rápido crescimento que compunham o ficheiro de dados. Tomé

(1989) e Carvalho (1999) utilizaram as árvores dominantes para a definição do crescimento potencial em diâmetro no *E. globulus*.

As funções de crescimento utilizadas para modelar a função potencial podem incluir a qualidade da estação bem como a idade e dimensão das árvores que se desenvolveram na ausência de competição, ou na sua falta, das árvores dominantes.

Como alternativa é possível prever o acréscimo do povoamento e distribuí-lo pelas árvores que o compõem (Vanclay, 1994). O acréscimo do povoamento pode ser expresso em área seccional do povoamento, como acréscimo na soma dos diâmetros, acréscimo em biomassa ou em fotossíntese do coberto. Uma das formas mais largamente utilizadas consiste em colocar o acréscimo em área seccional de acordo com esta variável de dimensão:

$$\frac{\Delta g_i}{\Delta G_i} = \left( \frac{g_i}{G_i} \right)^w$$

onde  $g_i$  é a área seccional individual,  $G_i$  a área seccional do povoamento e  $w$  o peso, que pode variar de 0,93 a 1,25 para a *Eucalyptus regnans* (Vanclay, 1994).

Este processo está ligado aos modelos teóricos ou de base biológica em que se pretende explicar o crescimento recorrendo a parâmetros com significado físico ou biológico e que de alguma forma possam traduzir as leis do crescimento.

## 6.2. MATERIAL E MÉTODOS

Para a modelação do crescimento em diâmetro das árvores dominantes foram utilizados, tal como no estudo das classes de qualidade, os dados das 33 árvores dominantes abatidas nos povoamentos adultos de Bornes, Marão e Padrela, descritos no Capítulo II. Estes dados foram usados no ajustamento e selecção da função potencial. A medição dos diâmetros pelo método de análise do tronco foi efectuada por quinquénios obtendo-se um conjunto de pares de valores (diâmetro, idade) com 324 observações cuja caracterização é apresentada no Quadro 6.1. Os diâmetros com casca foram estimados com base numa equação do tipo  $d_{ij\_cc} = f(d_{ij\_sc})$  em que  $d_{ij\_cc}$  e  $d_{ij\_sc}$  são o diâmetro da árvore  $i$  a diferentes alturas  $j$  com e sem casca, respectivamente.

Quadro 6.1: Características dos dados usados na modelação do crescimento em diâmetro das dominantes, com casca, com a idade (função potencial).

Variáveis	Local			Total
	Bornes	Marão	Padrela	
Nº árvores abatidas	6	10	17	33
Nº pares ( $d_{dom}$ , t)	46	105	173	324
Idade **	45	63	65	65*
$d_{dom}^{***}$ - média	21,25	28,57	28,27	27,37
$d_{dom}^{***}$ - mínimo	3,99	4,15	2,87	2,87
$d_{dom}^{***}$ - máximo	37,75	56,18	64,08	64,08
$d_{dom}^{***}$ - desvio padrão	8,07	12,26	13,62	12,75

\* idade máxima; \*\* idade em anos; \*\*\* diâmetro dominante em cm.

Para a função modificadora foram utilizados os dados das parcelas permanentes de Bemlhevai (apenas as 3 parcelas com castanheiro puro), Bornes e Marão. Todas estas parcelas possuíam pelo menos duas medições sucessivas. Sempre que se verificou um intervalo de medição superior ou inferior a cinco anos, estimou-se o diâmetro com base na medição anterior mais o acréscimo médio verificado entre as duas medições multiplicado por cinco. Para as árvores que morreram entre medições, os acréscimos em diâmetro foram apenas calculados nos períodos de tempo em que as árvores se mantiveram vivas. Com estes valores calculou-se o acréscimo corrente em diâmetro e em área basal das diferentes parcelas, nos quinquênios possíveis, de acordo com as medições disponíveis. Este mesmo conjunto de dados (n=673) proveniente das parcelas referidas, cuja caracterização se encontra no Capítulo I, foi utilizado no ajustamento do modelo de crescimento em diâmetro.

### 6.2.1. Modelos e metodologias testadas

Para a modelação do crescimento em diâmetro recorreu-se como já se disse a um modelo do tipo *função potencial x função modificadora*. Esta metodologia tem sido utilizada por diversos autores (p. e. Martin e Ek, 1984; Courbaud *et al.*, 1993; Quicke *et al.* 1994; Vanclay, 1994; Soares e Tomé, 1997; Lynch *et al.*, 1999; Carvalho, 1999; Huebschmann *et al.*, 2000; Lessard *et al.*, 2001; Reed *et al.*, 2003).

A função potencial, que como o nome indica traduz o crescimento potencial da árvore, foi definida tendo em conta o crescimento das árvores dominantes. A taxa de crescimento potencial é determinada com base na diferença de dimensão entre o início e o final do período de crescimento das árvores dominantes, admitindo-se que esta taxa é igual para todas as árvores dominantes do povoamento. Este procedimento, válido apenas para os povoamentos equiênicos homogêneos, pressupõe que as árvores do

povoamento com dimensão inferior às dominantes apenas o são devido ao efeito da competição.

A função modificadora tem a particularidade de diminuir o crescimento potencial das árvores uma vez que representa o ambiente de competição do povoamento, ou seja, a capacidade de cada indivíduo para a obtenção dos recursos disponíveis necessários ao crescimento num meio limitado.

#### 6.2.1.1. Função potencial

Para a modelação da função potencial do crescimento em diâmetro, determinada com base na diferença dos diâmetros observados no início e no final do período de crescimento, foram testadas as mesmas equações às diferenças apresentadas no Quadro 2.4 do Capítulo II – *Avaliação da qualidade da estação e modelação da altura dominante*. Testou-se também a equação Lundqvist-Korf com parâmetro livre  $k$ , com  $n=1$ , o que corresponde à equação de Schumacher com parâmetro livre  $k$ . Estas funções permitem estimar o crescimento em diâmetro no momento  $t_2$  em função do crescimento em diâmetro no momento  $t_1$  e da idade nos momentos  $t_1$  e  $t_2$ .

#### 6.2.1.2. Função modificadora

Numa primeira fase efectuou-se uma análise exploratória pelo método de todas as regressões possíveis com listagem dos modelos de crescimento em diâmetro e em área basal independentes da distância com maior  $R^2$  ajustado. Nos algoritmos combinatórios procurou-se garantir que o modelo incluisse variáveis que reproduzissem os diversos factores relativos ao crescimento da árvore:

- Características da árvore no início da projecção:  $d$ , diâmetro à altura do peito (cm);  $g$ , área seccional ( $cm^2$ );  $h$ , altura total (m);  $idm$  e  $igm$ , acréscimo médio anual em diâmetro ( $cm\ ano^{-1}$ ) e em área seccional ( $cm^2\ ano^{-1}$ ), respectivamente;  $t$ , idade em anos.

- Dimensão relativa da árvore (medidas de dominância da árvore):  $Rd$ , razão entre o diâmetro à altura do peito  $d$  e o diâmetro quadrático médio das árvores dominantes  $d_{dom}$ ;  $Rdm$ , razão entre o diâmetro  $d$  e o diâmetro da árvore de área basal média  $d_g$ ;  $Rbm$ , razão entre a área seccional da árvore,  $g$  e a área seccional média  $g_m$ .

- Ambiente geral de competição (nível do povoamento):  $G$ , área basal ( $m^2\ ha^{-1}$ );  $N$ , número de árvores por hectare;  $BAL$ , área basal das árvores com diâmetro superior ao da árvore considerada ( $m^2\ ha^{-1}$ ); o inverso de cada uma destas variáveis.

- Medidas da produtividade da estação:  $SI_{45}$ , índice de qualidade da estação;  $h_{dom}$ , altura dominante ( $m$ ).

Os melhores modelos seleccionados por cada um dos algoritmos foram então analisados para verificar a significância de todas as variáveis incluídas e a sua colinearidade com base no factor de inflação da variância ( $VIF$ ). Sempre que alguma variável não era significativa ( $P > 0,05$ ) ou possuía demasiada colinearidade ( $VIF > 15$ ) testavam-se modelos alternativos até encontrar o melhor modelo com todas as variáveis significativas e menor colinearidade. Os melhores modelos foram seleccionados com base no valor do  $R^2$  ajustado e caracterizados com as seguintes medidas de qualidade da regressão linear múltipla:  $R^2_{ajust}$ ,  $R^2$ ,  $C(p)$  – *Mallows* e  $QMR$ .

Para comparação da capacidade das medidas de competição para explicar o crescimento em diâmetro e em área seccional efectuaram-se também correlações simples entre o crescimento e as variáveis/ índices que expressam a competição para além da análise do seu contributo para regressões múltiplas. Para análise da contribuição de cada uma das variáveis/ índices para diferentes variações dos modelos lineares utilizou-se o valor do teste de  $t$  (*teste F – parcial*) correspondente a acrescentar cada uma das variáveis ao modelo.

A significância dos modelos lineares seleccionados foi confirmada nos modelos não lineares usados como funções modificadoras e posteriormente no modelo não linear de crescimento em diâmetro do tipo *função potencial x função modificadora*. Nesta análise teve-se em conta sobretudo a significância dos parâmetros, avaliada com base na observação dos valores dos extremos do respectivo intervalo de confiança assintótico, o qual não deve incluir o valor zero, e a colinearidade avaliada com base do número de condição de matriz  $NCOND$ .

Para modelar a redução do crescimento devida à competição foram testadas as funções modificadoras que a seguir se apresentam:

- *Exponencial*<sub>1</sub> ( $1 - e^{-x}$ ) e *exponencial*<sub>2</sub> ( $e^{-x}$ );
- *Logística* ( $1/(1 + e^{-x})$ );
- *Weibull* ( $1 - e^{-x^w}$ ).

Foram testadas diversas versões das funções modificadoras com as variáveis/ índices independentes da distância referidas. A melhor formulação do modelo *função potencial x função modificadora* foi seleccionada com base no menor quadrado médio

dos resíduos (*QMR*) apresentado pelos modelos com todas as variáveis significativas ( $P < 0,05$ ) e colinearidade aceitável.

### 6.2.2. Critérios utilizados no ajustamento e selecção dos modelos

O ajustamento das funções apresentadas no Quadro 2.4 ao conjunto de pares de valores (diâmetro dominante, idade) foi efectuado segundo o procedimento utilizado nos pontos anteriores. Assim, utilizou-se o método dos mínimos quadrados não lineares ordinários (*OLS*) com recurso ao procedimento *PROC NLIN* do programa *SAS/STAT* com o método iterativo de minimização de Gauss-Newton.

A selecção dos melhores modelos de crescimento em diâmetro foi efectuada a partir da análise das suas propriedades estatísticas e dos resultados da validação através de estatísticas derivadas dos resíduos *PRESS*.

Os modelos com comportamentos incorrectos do ponto de vista biológico, nomeadamente com o valor da assíntota inferior ao diâmetro máximo da base de dados, foram eliminados. Não se conhecendo o limite do crescimento em diâmetro do castanheiro em povoamento para produção de madeira, uma vez que é completamente diferente do observado em árvores isoladas e em sotos, onde são conhecidos exemplares de grandes dimensões geralmente ocos, optou-se por seleccionar uma assíntota com um valor bastante superior ao maior diâmetro observado.

A verificação de não normalidade dos resíduos foi ultrapassada, da mesma forma que anteriormente, com recurso à regressão dos mínimos quadrados não lineares ponderada iterativamente “*iteratively reweighted least squares*” (*IRWLS*) com recurso à função de *Huber* com um valor limite de  $r = 1,5$ .

A análise dos gráficos dos resíduos studentizados *vs.* valores estimados demonstrou alguma assimetria dos resíduos o que evidencia alguns problemas ao nível da homogeneidade da variância. Assim, foi utilizado um factor de ponderação igual ao inverso da raiz quadrada do diâmetro dominante na idade  $t_i$  ( $1/\sqrt{ddom1}$ ) o qual faz parte das variáveis independentes dos modelos ajustados. Este factor, seleccionado de entre outros, foi aquele que apresentou alguma melhoria relativamente à não ponderação.

Os critérios de ajustamento utilizados foram essencialmente a soma de quadrados dos resíduos *SQR*, o quadrado médio dos resíduos *QMR*, a eficiência de

modelação *EM*, e os valores dos extremos do respectivo intervalo de confiança assintótico dos valores dos parâmetros.

Foram também utilizadas as estatísticas de predição: média e média do valor absoluto dos resíduos *PRESS* (*mPRESS* e *maPRESS*, respectivamente) e  $R^2$  de predição ( $R^2_{pred}$ ).

Os melhores modelos assim seleccionados foram reajustados substituindo  $t_1$  e  $t_2$  por  $(t-t_0)$ , uma vez que a função de crescimento em diâmetro deve passar pelo ponto  $(t_0, 0)$  e não  $(0, 0)$ , com  $(t_0 > 0)$ , representando  $t_0$  o tempo que uma árvore leva a atingir a altura de  $1,30\text{ m}$ .

Os modelos seleccionados foram ainda modificados para permitir a variação dos parâmetros em função de variáveis do povoamento, como a classe de qualidade.

Após a selecção do melhor modelo de crescimento em diâmetro dominante calibrado com as variáveis relativas ao povoamento, o qual define o crescimento potencial, ajustou-se esta função juntamente com as funções modificadoras obtidas de acordo com os critérios descritos no ponto 6.2.1.2.. Os modelos finais assim obtidos foram de novo avaliados quanto à qualidade do ajustamento e pressupostos da regressão com base na análise gráfica dos resíduos studentizados.

## 6.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.4.1. Função potencial

Os resultados do ajustamento das equações às diferenças, mencionadas no Quadro 2.4 , aos dados de crescimento em diâmetro obtidos nas árvores abatidas pelo método de análise do tronco conduziram à eliminação antecipada de alguns modelos com assíntota comum, à excepção do modelo Lundqvist-Korf (*LKI*), pelo facto de apresentarem assíntotas com valores inferiores ao máximo do diâmetro dominante observado. O modelo *CR3* não foi eliminado por possuir um valor da assíntota bastante próximo do máximo do diâmetro observado. O Quadro 6.2 resume as principais estatísticas de ajustamento, precisão e enviesamento consideradas na selecção dos modelos.

Quadro 6.2: Estatísticas de ajustamento e predição dos modelos utilizados na modelação do crescimento em diâmetro das árvores dominantes.

Modelo	Parâmetros				QMR	R <sup>2</sup> <sub>ajust</sub>	mPRESS	maPRESS	R <sup>2</sup> <sub>pred</sub>
	A	n	k	m					
LK1	94,658	0,684	-	-	2,401	0,985	-0,016	1,230	0,985
LK2	-	0,556	10,064	-	3,221	0,980	0,209	1,381	0,980
CR1	52,035	-	-	0,507	2,772	0,981	-0,102	1,358	0,983
CR2	-	-	0,049	0,507	3,046	0,981	0,298	1,291	0,979
CR3	61,164	-	0,026	-	3,546	0,978	0,058	1,528	0,978
MA	57,671	1,816	-	-	2,737	0,983	0,005	1,326	0,982
AB	-	-0,026	-6,491	-	4,489	0,972	0,577	1,567	0,969
SH	60,598	-	-	-	3,023	0,981	-0,025	1,320	0,981

mPRESS e maPRESS, média e média do valor absoluto dos resíduos PRESS; QMR, quadrado médio dos resíduos, A, n, k, m, parâmetros. SH, equação de Shumacher com parâmetro livre k:  $y_2 = A(y_1 / A)^{(t/t_0)}$

Os modelos foram reajustados com a substituição de  $t$  por  $t-t_0$ . Com esta substituição obtiveram-se valores negativos do parâmetro  $t_0$  para metade das funções utilizadas (*LK1*, *LK2*, *AB* e *SH*). No reajustamento da equação *CR2* com  $t$  substituído por  $t-t_0$ , o parâmetro  $t_0$  apresentou um valor positivo, contudo não se mostrou significativo ( $P < 0,05$ ) pelo que foi retirado do modelo.

Assim, foram eliminados todos os modelos que apresentaram valores de  $t_0$  inferiores a zero por não ser considerado correcto do ponto de vista biológico.

O modelo *CR3*, que apresentava uma assíntota abaixo do valor do diâmetro dominante máximo observado, mostra nesta fase uma pronunciada subida da assíntota com um valor claramente acima do máximo observado ( $A=69,318$ ). Dado o impulso observado no valor da assíntota para este modelo, foram confirmados os efeitos desta substituição também nos modelos previamente eliminados por possuírem uma assíntota demasiado baixa. Em nenhum dos modelos eliminados se verificou uma subida tão considerável que justificasse a sua manutenção na análise.

Nesta fase foram mantidos em análise apenas os modelos *CR2* e *CR3*, cujo valor limite se aproxima do máximo observado, pelo que decidimos repescar o modelo *LK1* ajustado neste caso sem o parâmetro  $t_0$ . A análise dos resíduos studentizados destes modelos revelou alguns problemas relativos à não homogeneidade da variância com resíduos assimétricos e afastamentos da normalidade (principalmente nos modelos *CR3* e *LK1*). Por esta razão procedeu-se ao reajustamento dos mesmos através de regressão ponderada pela função de Huber com  $r=1,5$  e  $(1/\sqrt{d\text{dom}1})$ . Posteriormente,

reajustaram-se com os parâmetros expressos em função do índice de classe de qualidade (*SI*) para traduzir as condições específicas de cada povoamento. No Quadro 6.3 são apresentados os resultados do reajustamento dos modelos com todos os parâmetros significativos ( $P < 0,0001$ ) após modificação da assíptota em função da classe de qualidade.

Quadro 6.3: Valores dos parâmetros e estatísticas de ajustamento dos modelos previamente seleccionados, após ponderação pela função de Huber e  $1/\sqrt{|ddom|}$ , e reajustamento em função do índice de classe de qualidade.

Função	A=a <sub>0</sub> +a <sub>1</sub> SI		t <sub>0</sub> =t <sub>00</sub> +t <sub>1</sub> /SI		m=m <sub>0</sub> +m <sub>1</sub> SI		k=k <sub>1</sub> SI	n	QMR	EM
	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	t <sub>00</sub>	t <sub>1</sub>	m <sub>0</sub>	m <sub>1</sub>	k <sub>1</sub>			
LK1	468,2000	-13,1995	-	-	-	-	-	0,6598	0,4718	0,9885
CR2	-	-	-	-	0,8161	-0,0101	0,0027	-	0,4881	0,9881
CR3	-	3,0325	-5,4956	199,7	-	-	0,0009	-	0,7473	0,9817

A, assíptota (cm); SI, índice de qualidade da estação à idade padrão 45 anos; t<sub>0</sub>, a idade em anos que demora a atingir o ponto (t<sub>0</sub>, 0); k, m, n, são parâmetros.

O modelo *LK1* não apresenta um comportamento biológico adequado uma vez que estima valores da assíptota inferiores para as classes de qualidade mais elevadas, embora superiores ao valor máximo do ficheiro de dados (64,1 cm aos 65 anos) e por esta razão não será considerado. Quanto às versões da função Chapman-Richards verifica-se que estas possuem um valor da assíptota bastante próximo do valor máximo observado, apesar disso, são os modelos que em função dos dados actualmente disponíveis melhor traduzem o crescimento em diâmetro dominante para o castanheiro. Assim, embora o modelo *CR2* passe pelo ponto (0, 0) o parâmetro de forma *k* que determina a taxa à qual a assíptota é atingida e o parâmetro de forma *m*, importante na determinação da localização do ponto inferior de inflexão da curva sigmoideal, variam com a qualidade da estação. Desta forma a taxa de crescimento à qual a assíptota é atingida é superior para as melhores classes de qualidade, o que faz sentido em termos biológicos e o ponto de inflexão da curva é tanto mais baixo quanto maior for a classe de qualidade, ou seja, o crescimento inicial das árvores dominantes é mais rápido nas melhores estações.

Analisando agora o modelo *CR3* verifica-se um aumento no valor da assíptota à medida que a classe de qualidade aumenta, o que está correcto em termos biológicos. Por sua vez o parâmetro de forma *k* varia com a qualidade da estação, ou seja, é afectado pelas condições ambientais características do local, indo ao encontro do

expectável. Este parâmetro está relacionado com a taxa de crescimento que determina a taxa à qual a assíntota é atingida, obtendo-se um valor superior para as melhores classes de qualidade como se esperava. Valores elevados de  $k$  indicam grandes taxas de crescimento intrínsecas só passíveis de serem atingidas nas melhores estações.

No Quadro 6.4, apresentam-se as estatísticas de ajustamento e previsão dos modelos  $CR2$  e  $CR3$  após reajustamento com a variável  $SI$  introduzida. São apresentados também os valores mínimos e máximos da assíntota correspondente a uma qualidade da estação superior ( $SI=26$ ) e inferior ( $SI=14$ ).

Quadro 6.4: Estatísticas de ajustamento e previsão das funções de crescimento em diâmetro potencial seleccionadas. Valor mínimo e máximo da assíntota estimado com os índices de qualidade da estação 14 e 26.

Mod.	$A = a_1 SI$		QMR	EM	mPRESS	maPRESS	P95	P5	$R^2_{pred}$	NCOND
	$A_{min.}$	$A_{máx.}$								
CR2	22,813	59,567	0,488	0,988	0,101	1,118	2,671	-2,178	0,987	133,741
CR3	42,455	78,845	0,747	0,982	0,129	1,457	3,634	-2,642	0,978	107,766

A, assíntota (cm); SI, índice de qualidade da estação à idade padrão 45; t, a idade em anos; k, m, parâmetros; NCOND, número de condição da matriz das derivadas parciais da função em ordem a cada um dos parâmetros calculada no ponto solução; P95 e P5, percentis 95% e 5%, respectivamente.

A análise gráfica dos resíduos studentizados vs. valores estimados dos modelos pré-seleccionados revelou alguma assimetria na distribuição dos mesmos, conforme se pode observar na Figura 6.1 e maior tendência para afunilar no modelo  $CR2$ . Por sua vez os gráficos em papel de probabilidades normal, igualmente para os resíduos studentizados, aproximam-se dos padrões de normalidade (vide Fig. 6.2).

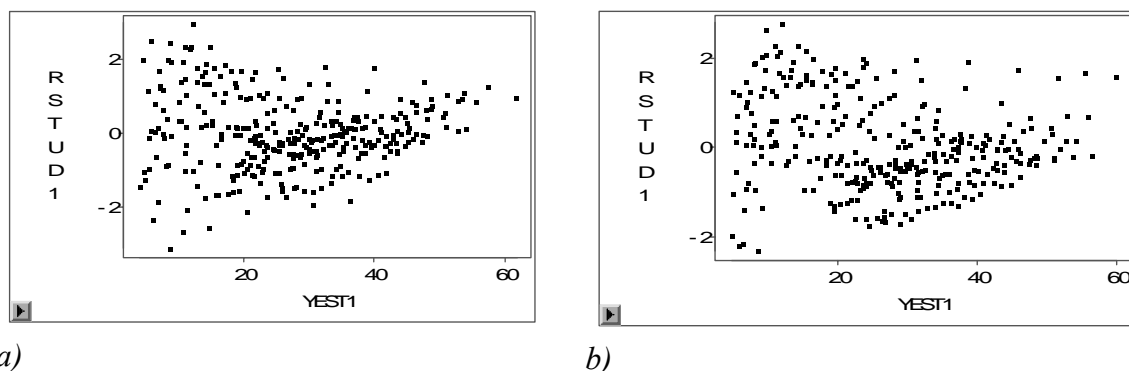


Figura 6.1: Gráfico dos resíduos studentizados vs. diâmetro dominante estimado, para os modelos  $CR2$  - a) e  $CR3$  - b), após ponderação pela função de Huber e  $1/\sqrt{ddom1}$ .

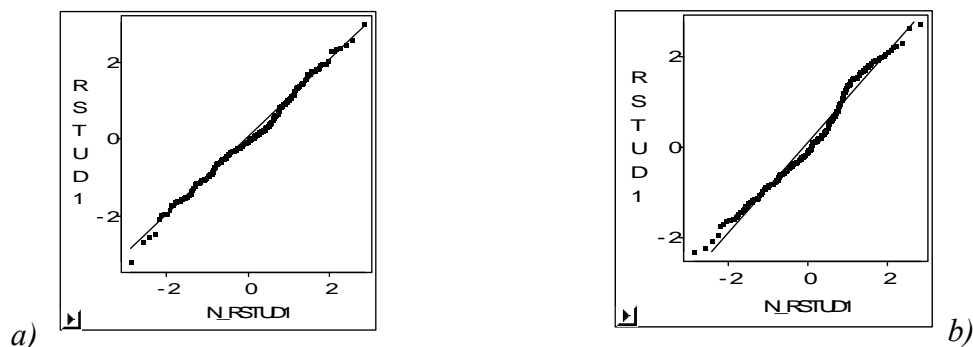


Figura 6.2: Gráficos em papel de probabilidades normal para os resíduos studentizados obtidos com os modelos *CR2* – a) e *CR3* – b), após ponderação pela função de Huber e  $1/\sqrt{ddom1}$ .

Embora a variável *SI* usada na modificação dos parâmetros em função das características da estação contribua significativamente para o aumento da capacidade preditiva dos modelos, a sua inclusão não diminuiu grandemente o quadrado médio dos resíduos, assim como a substituição de  $t$  por  $t-t_0$ . De qualquer forma verifica-se uma ligeira superioridade dos modelos com a inclusão desta variável nos seus parâmetros, relativamente à sua não inclusão.

Em virtude dos dados disponíveis para a modelação do crescimento em diâmetro das dominantes não serem muito abundantes optou-se por validar os modelos com base nos resíduos *PRESS*. Para tal analisou-se a média e a média do valor absoluto dos resíduos *PRESS* de predição por classe de idade e por classe de qualidade dos modelos seleccionados (*vide* Quadro 6.5).

Quadro 6.5: Média dos resíduos de predição *mPRESS* e média dos resíduos de predição em valor absoluto *maPRESS*, por classes de idade e qualidade, dos modelos de crescimento em diâmetro *CR2* e *CR3*.

Mod	t < 15 (n=46)	15 ≤ t < 25 (n=66)	25 ≤ t < 35 (n=66)	35 ≤ t < 45 (n=64)	45 ≤ t < 55 (n=52)	t ≥ 55 (n=30)		
CR2	0,311  1,444	-0,111  1,554	-0,126  1,297	0,090  0,808	0,308  0,718	0,410  0,623		
CR3	0,723  1,695	0,789  1,774	0,006  1,568	-0,448  1,343	-0,265  1,108	-0,048  1,033		
Mod	SI < 15 (n=23)	15 ≤ SI < 17 (n=26)	17 ≤ SI < 19 (n=74)	19 ≤ SI < 21 (n=64)	21 ≤ SI < 23 (n=53)	23 ≤ SI < 25 (n=48)	25 ≤ SI < 27 (n=33)	SI ≥ 27 (n=3)
CR2	-0,800  1,253	0,910  1,514	0,298  1,019	-0,018  1,004	0,331  0,975	-0,391  1,097	-0,159  1,272	-0,093  1,856
CR3	0,137  1,803	1,579  1,899	0,417  1,556	0,305  1,206	0,703  1,221	-1,010  1,926	-0,997  1,741	-0,395  0,935

Analisando o Quadro 6.5 não é evidente qualquer tendência de aumento ou diminuição da média dos resíduos de predição, tanto por classe de idade como por classe de qualidade, embora em termos da média dos resíduos de predição absolutos se observe uma diminuição a partir dos 25 anos.

O modelo *CR3* é ligeiramente enviesado negativamente a partir dos 35 anos, ou seja, tem tendência para sobrestimar o crescimento em diâmetro dominante nestas idades. Este modelo sobrestima para as classes de qualidade superiores a 22. Por sua vez o modelo *CR2* é levemente enviesado positivamente para a maioria das classes de *t*, subestimando o crescimento em diâmetro dominante e consequentemente apresentando estimativas por defeito na maioria dos casos. Relativamente à classe de qualidade o número de classes de *SI* em que se verifica uma sobrestima do diâmetro dominante é superior ao número de classes em que se observa uma subestima, mas sem qualquer tendência evidente.

O modelo *CR2* apresenta um maior número de classes de *SI* onde os desvios médios são inferiores aos do modelo *CR3*. O desvio médio máximo do modelo *CR2* é de 0,91 cm, observado para a classe de *SI* 16, enquanto para o modelo *CR3* o enviesamento máximo é de 1,58 cm igualmente para a classe de *SI* 16. O valor médio do erro absoluto de predição é no máximo de 1,86 cm para o modelo *CR2* e 1,93 cm para o modelo *CR3*.

Assim, na apreciação global dos modelos não são detectadas grandes diferenças entre os modelos *CR2* e *CR3*, embora o modelo *CR2* seja superior em termos de qualidade do ajustamento e apresente médias do valor absoluto dos resíduos de predição mais baixas. Se tivermos em conta o limite superior, o modelo *CR3* é mais vantajoso com uma assíntota que varia em função da classe de qualidade e assume valores superiores ao modelo *CR2* e acima do máximo observado. Não se aproxima contudo do máximo biológico uma vez que os modelos são o reflexo dos dados com os quais foram obtidos, no entanto, parece-nos um valor relativamente bom para o castanheiro para produção de madeira de qualidade.

Finalmente, é de salientar que os modelos *CR2* e *CR3* não estimam acréscimos negativos e são limitados superiormente (existência de assíntota). O modelo Chapman-Richards (*CR2*) não considera o tempo que a árvore demora a atingir 1,30 m uma vez que na substituição de *t* por  $t-t_0$ , o parâmetro  $t_0$  não se mostrou significativo.

Assim, dos modelos pré-seleccionados na primeira abordagem para traduzir o crescimento potencial em diâmetro, a selecção final recai sobre a função Chapman-Richards (CR3) com assíntota comum e parâmetro livre “ $m$ ”

Trata-se de um modelo que traduz o crescimento biológico, não produz acréscimos negativos, está limitado superiormente por uma assíntota que varia em função da classe de qualidade. Por outro lado, passa pelo ponto  $(t_0, 0)$  variando o valor de  $t_0$ , correspondente ao tempo que uma árvore leva a atingir a altura de  $1,30\text{ m}$ , em função da classe de qualidade.

Desta forma o crescimento potencial em diâmetro é traduzido pela seguinte equação:

$$ddom_2 = A \frac{1 - \frac{\ln(1 - e^{-k(t_2 - t_0)})}{\ln(1 - e^{-k(t_1 - t_0)})}}{\ln(1 - e^{-k(t_1 - t_0)})} ddom_1, \quad \text{com}$$

$$A = 3,0325\text{ SI}, \quad k = 0,914 \cdot 10^{-3}\text{ SI}, \quad t_0 = -5,4956 + 199,7000/\text{SI}, \quad EM = 0,9817,$$

$$QMR = 0,7473, \quad R^2_{pred} = 0,9785.$$

O modelo tem para já uma prestação bastante razoável mas poderá ainda ser melhorado à medida que novos dados forem estando disponíveis para que se possa aferir melhor o seu comportamento.

#### 6.4.2. Função modificadora

Numa primeira fase fez-se uma análise exploratória de modelos de crescimento da árvore individual conforme descrito na metodologia. O ajustamento dos melhores modelos encontrados pelo método de todas as regressões possíveis para as variáveis  $id$  e  $ig$  (respectivamente, acréscimo corrente em diâmetro e acréscimo corrente em área seccional) em função das variáveis que traduzem a dimensão inicial da árvore individual, medidas de produtividade da estação, medidas de dominância da árvore e competição ao nível do povoamento (*vide* ponto 6.2.1.2.), utilizadas no algoritmo combinatório, conduziu à selecção dos modelos de crescimento em diâmetro e em área seccional apresentados no Quadro 6.6. Os melhores modelos assim obtidos foram avaliados quanto à significância das variáveis incluídas e analisada a sua colinearidade.

Ao longo desta análise verificou-se que a idade  $t$  e o diâmetro  $d$ , embora contribuíssem significativamente para a diminuição do erro dos modelos, aumentavam grandemente a sua colinearidade. Por outro lado, o  $BAL$  está mais correlacionado com o acréscimo em área seccional do que com o acréscimo em



Da análise das correlações estabelecidas destaca-se o seguinte:

- Os índices *Rbm*, *Rdm* e *Rd* estão correlacionados entre si, mas não estão ou estão muito pouco correlacionados com as restantes variáveis da árvore individual, medidas de produtividade da estação e competição ao nível do povoamento;
- O índice de dominância da árvore *Rd* é o que apresenta melhor correlação (0,45) com o índice *BAL* que traduz a competição ao nível do povoamento;
- O índice *BAL* está correlacionado sobretudo com variáveis iniciais da árvore, medidas da produtividade da estação e ambiente geral da competição.

Para seleccionar a melhor formulação com as variáveis/ índices independentes da distância para o modelo do tipo *função potencial x função modificadora*, foram testadas as funções modificadores referidas na metodologia (ponto 6.2.1.2.). O parâmetro “*x*” das funções modificadoras assumiu diversas combinações lineares de variáveis/ índices independentes da distância, entre as quais as apresentadas no Quadro 6.6, com vista à minimização da soma de quadrados dos resíduos, com todos os parâmetros significativos e menor colinearidade. No Quadro 6.8 são apresentados os resultados finais do ajustamento e predição do modelo de crescimento em diâmetro com as diferentes funções modificadoras e as variáveis/ índices que apresentaram melhor desempenho. As funções foram ponderadas iterativamente com recurso à função de *Huber* com um valor limite de *r=1,5*. A função de *Weibull* não convergiu satisfatoriamente pelo que não serão apresentados quaisquer resultados relativos a esta função.

Quadro 6.8: Estatísticas de ajustamento e predição do modelo de crescimento em diâmetro e valor máximo e mínimo assumidos pela função modificadora, após ponderação (*IRWLS*).

Modelo	$R^2_{ajust}$	QMR	mPRESS	maPRESS	$R^2_{pred}$	$fm_{min}$	$fm_{máx}$
$d_{t2}=d_{t1}+ipot \times 1/(1+e^{\beta_0+\beta_1 SI+\beta_2 idm+\beta_3 Rd+\beta_4 invG+\beta_5 hdom+\beta_6 N})$	0,991	0,696	0,205	0,708	0,990	0,027	0,998
$d_{t2}=d_{t1}+ipot \times e^{\beta_0+\beta_1 SI+\beta_2 idm+\beta_3 Rd+\beta_4 invG+\beta_5 hdom+\beta_6 N}$	0,991	0,711	0,048	0,730	0,989	0,167	2,364
$d_{t2}=d_{t1}+ipot \times (1-e^{\beta_0+\beta_1 SI+\beta_2 idm+\beta_3 Rd+\beta_4 invG+\beta_5 hdom+\beta_6 N})$	0,989	0,869	0,180	0,785	0,987	-0,454	0,945

$d_{t2}$  e  $d_{t1}$ , diâmetro *d* na idade *t2* e *t1*, respectivamente; *ipot*, crescimento potencial obtido através do modelo *CR3*;  $fm_{min}$  e  $fm_{máx}$ , valor mínimo e máximo da função modificadora.

Analisando o Quadro 6.8 verifica-se que o modelo de crescimento em diâmetro com a função modificadora logística apresenta melhor ajustamento e predição, logo seguido do modelo com a função modificadora *exponencial*<sub>2</sub> ( $e^{-x}$ ). Por sua vez a análise gráfica dos resíduos studentizados revelou aproximação aos padrões

de normalidade para todos os modelos, mas com variância heterogénea evidente para os modelos de crescimento que têm como função modificadora a *logística*  $(1/(1+e^{-x}))$  e a *exponencial*<sub>1</sub>  $(1-e^{-x})$ .

Examinando os valores máximos e mínimos das funções modificadoras, as quais devem assumir valores compreendidos entre 0 e 1, verifica-se que a função logística é a única que obedece a esta condição e por esta razão é seleccionada como modelo final em detrimento do modelo *exponencial*<sub>2</sub>  $(e^{-x})$ , com melhor qualidade do ajustamento.

De seguida foi analisada a distribuição dos resíduos *PRESS* de predição do modelo seleccionado por classes de idade, qualidade e densidade (Quadro 6.9).

O modelo seleccionado subestima de uma maneira geral o crescimento em diâmetro. O maior enviesamento por classe de *SI* é observado para as classes inferiores a 15 com 0,61 cm, sendo bastante inferior para a maioria das restantes classes. Se considerarmos a análise por classes de idade e densidade o desvio máximo é de 0,96 cm para a classe dos 60 anos e uma classe de densidade de 500 ár<sub>v</sub> ha<sup>-1</sup>. O modelo é menos preciso para a classe de *SI* 26, com 0,74 cm de erro máximo absoluto e para a classe de idade dos 60 anos, com 1,17 cm. Às maiores idades correspondem menores densidades e por esse facto a menor precisão é observada na classe de densidade de 500 ár<sub>v</sub> ha<sup>-1</sup>.

Quadro 6.9: Média dos resíduos de predição *mPRESS* e média dos resíduos de predição em valor absoluto *maPRESS*, por classes de idade, qualidade e densidade, do modelo de crescimento em diâmetro seleccionado.

Modelo	t < 15	15 ≤ t < 25	25 ≤ t < 35	35 ≤ t < 45	45 ≤ t < 55	t ≥ 55	
	(n=262)	(n=291)	(n=0)	(n=68)	(n=0)	(n=52)	
<i>ipot x 1/(1+e<sup>-x</sup>)</i>	0,297	-0,019	-	0,235	-	0,958	
	0,712	0,630	-	0,675	-	1,167	
Modelo	SI < 15	15 ≤ SI < 17	17 ≤ SI < 19	19 ≤ SI < 21	21 ≤ SI < 23	23 ≤ SI < 25	25 ≤ SI < 27
	(n=104)	(n=0)	(n=139)	(n=57)	(n=185)	(n=94)	(n=26)
<i>ipot x 1/(1+e<sup>-x</sup>)</i>	0,607	-	0,227	0,516	0,225	-0,169	0,402
	0,621	-	0,590	0,677	0,541	0,590	0,736
Modelo	250 ≤ N < 750	750 ≤ N < 1250	1250 ≤ N < 1750				
	(n=52)	(n=553)	(n=68)				
<i>ipot x 1/(1+e<sup>-x</sup>)</i>	0,958	0,131	0,235				
	1,167	0,669	0,675				

### 6.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O melhor modelo de crescimento em diâmetro do tipo *função potencial x função modificadora* selecionado é representado pela seguinte expressão:

$$d_{t2}=d_{t1}+\left\{\left[A \frac{1-\frac{\ln(1-e^{-k(t2-t0)})}{\ln(1-e^{-k(t1-t0)})}}{ddom_{t1}}\right]-ddom_{t1}\right\} * \frac{1}{\left(1+e^{\beta_0+\beta_1SI+\beta_2idm+\beta_3Rd+\beta_4invG+\beta_5hdom+\beta_6N/1000}\right)}$$

$$com, A=3,0325 SI, k=0,9140 \cdot 10^{-3} SI, t_0=-5,4956+199,7000/SI,$$

$$\beta_0=3,9954, \beta_1=-0,3451, \beta_2=5,7114, \beta_3=-4,2316, \beta_4=0,0054, \beta_5=0,1266, \beta_6=0,7170,$$

$$QMR=0,6959 \quad EM=0,9914 \quad R^2_{pred}=0,9896$$

Este modelo estima valores do diâmetro com erros muito aceitáveis se considerarmos a assimetria do tronco e a irregularidade da casca, mais notória nas árvores mais velhas, onde se verificam os maiores erros. A função modificadora assume valores entre 0 e 1.

O modelo apresentado poderá ainda ser melhorado à medida que se forem obtendo novos dados. Para isso muito contribuirão as parcelas permanentes instaladas nos povoamentos jovens no decorrer deste trabalho, bem como os novos dados provenientes do crescimento das parcelas permanentes instaladas nos povoamentos adultos existentes que continuarão a ser acompanhadas.

## CAPÍTULO VII

### TABELAS DE PRODUÇÃO PROVISÓRIAS PARA O CASTANHEIRO EM REGIME DE ALTO FUSTE.

Nos capítulos anteriores deste trabalho foram desenvolvidas diversas equações de predição para variáveis da árvore bem como a definição de curvas de classe de qualidade para a região em estudo (Trás-os-Montes e Entre Douro e Minho). Neste capítulo faz-se uso de alguns desses modelos obtidos previamente para estimar a produção ao nível do povoamento. Apesar dos dados disponíveis serem relativamente limitados, devido em parte à reduzida área ocupada pelos povoamentos adultos de castanheiro em regime de alto fuste, será apresentado um modelo de crescimento de povoamento do tipo tabela de produção. Esta tabela de produção terá um carácter provisório na medida em que a função de produção em volume total do povoamento não poderá ser determinada com exactidão devido ao desconhecimento do volume retirado dos povoamentos ao longo dos tempos. Admite-se que esse volume se restringe praticamente à mortalidade natural, pouco expressiva, ocorrida ao longo do tempo. De qualquer forma o volume total do povoamento será sempre uma subestima do seu verdadeiro valor uma vez que não se contabiliza a mortalidade.

#### 7.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

As tabelas de produção exprimem a evolução no tempo dos povoamentos equiúnicos. Podem ser apresentadas sob a forma de tabelas, gráficos ou funções matemáticas. Neste último caso trata-se de um encadeamento de funções matemáticas ou equações que exprimem as ligações existentes tanto entre uma dada característica dendrométrica e a idade como entre características dendrométricas entre si (Rondeux, 1993), a que o autor prefere chamar “modelo de crescimento”. As tabelas traduzem, para uma dada espécie, o desenvolvimento observado ou provável ao longo do tempo, seja de 5 em 5 anos seja de 10 em 10 anos, de povoamentos homogéneos em princípio puros, equiúnicos, normalmente densos, sem clareiras nem excedentes de material (Rondeux, 1993).

Avery e Burkhart (1994) consideram três tipos de tabelas de produção relacionadas com as variáveis explicativas que incorporam:

- tabelas de produção normais (pressupõem que a densidade dos povoamentos é “normal” ou “completa”, o que leva a supor que os povoamentos ocupam completamente a estação de crescimento e utilizam ao máximo as potencialidades existentes);

- tabelas de produção empíricas (referentes a povoamentos de densidade “média”);

- tabelas de produção de densidade variável (cobrem um número mais vasto de situações que as anteriores uma vez que incluem a densidade como variável explicativa tal como a idade).

As tabelas de produção clássicas, designadas por tabelas de produção médias, apresentam alguns inconvenientes (Pardé e Bouchon, 1988):

- são estabelecidas a partir de árvores e de povoamentos que representam uma determinada silvicultura praticada no momento da colheita de dados (designada por silvicultura média);

- baseiam-se em parcelas que traduzem situações de densidade média dos povoamentos em estudo, excluindo sistematicamente da amostragem as clareiras e os acidentes de gestão, não traduzindo a realidade florestal;

- fornecem apenas indicações globais e simples tais como o volume total e médio e os acréscimos correspondentes;

- a maior parte destas tabelas explicitam raramente a situação dendrométrica do material em pé (povoamento principal) antes e depois do desbaste.

Para dar resposta a estes problemas têm vindo a desenvolver-se numerosos modelos de produção baseados em relações matemáticas estudadas à escala das árvores levando em consideração o crescimento particular de cada árvore que compõe o povoamento. São os chamados “modelos de árvore”, já referidos anteriormente, capazes de prever a produção florestal em função de tratamentos silvícolas ou outros parâmetros exteriores ao povoamento (Rondeux e Thibaut, 1996). Segundo estes autores uma solução intermédia menos elaborada reside na construção de tabelas de produção de silvicultura variável correspondentes a um modelo de produção simplificado derivado das tabelas de produção clássicas no seio das quais se faz variar a intensidade dos desbastes sob a restrição de um certo número de hipóteses. Estas tabelas de produção de silvicultura variável são derivadas das tabelas de produção clássicas fazendo uso da *lei de Eichhorn*, contudo não resolvem ainda todos os problemas (Pardé e Bouchon, 1988). Os modelos de produção têm esta ambição. A *lei*

de *Eichhorn* parte do princípio que, excluindo as densidades extremas e por isso dentro do chamado *campo de reacção do povoamento*, o volume total pode-se considerar função da altura dominante, independentemente da idade e dos tratamentos culturais aplicados (Oliveira, 1985; Alves, 1988). Uma vez que a altura dominante é pouco influenciada pela maioria das silviculturas praticadas, deduz-se logicamente que o acréscimo em volume é igualmente pouco dependente, dentro de uma grande amplitude de intensidades de desbaste, do tratamento silvícola (Rondeux e Thibaut, 1996). Contudo, convém referir que a análise de várias tabelas de produção europeias para uma mesma espécie mostrou que se podem observar produções diferentes para uma mesma altura dominante (Christie e Lines, 1975), o que tende a pôr em causa o suporte da *lei de Eichhorn*. Por este facto a hipótese de uma relação única entre a produção total dum povoamento e a altura dominante não é, em sentido estrito, aceitável, resolvendo-se este problema com a construção de tabelas de produção regionais ou ainda distinguindo várias relações de maneira a reduzir a variabilidade do volume total produzido para uma altura dominante fixada (Rondeux, 1993).

As tabelas de produção são instrumentos capazes de prestar numerosos e preciosos serviços, principalmente no domínio da gestão florestal, do planeamento regional e do estudo das estações de crescimento. Estas tabelas fornecem características médias, descrevendo o crescimento previsível dum povoamento para uma dada espécie, nível de fertilidade e região de crescimento. Quando bem utilizadas podem funcionar como um guia de silvicultura. Assim, em matéria de gestão florestal podem ser utilizadas para (Dagnelie *et al.*, 1988; Rondeux e Thibaut, 1996):

- previsão da produção lenhosa;
- apreciação de diversos tipos de tratamentos silvícolas;
- previsão das características dendrométricas de um povoamento num determinado momento;
- propor modelos silvícolas com base num objectivo pré-determinado ou desejado para a gestão de um determinado povoamento;
- escolher a idade óptima de revolução (termo da explorabilidade);
- apreciar e fundamentar propostas de arborização (escolha de espécies relacionadas com o nível de fertilidade e factores estacionais);
- realização de estimativas financeiras (em caso de avaliações, expropriações, calamidades, etc.) e obtenção de tabelas financeiras.

Em matéria de planeamento regional as tabelas de silvicultura variável serão um precioso auxiliar para:

- a política florestal global (definição de cartas ou de zonas de potencialidades florestais, afectação de meios);

- as perspectivas de produção e disponibilidade de madeira para determinados períodos de tempo (podem servir de base aos modelos de simulação de disponibilidades de recursos).

A utilização de qualquer modelo ou tabela de produção está sujeita naturalmente a algumas restrições, destinando-se sobretudo à região de crescimento da espécie em causa com o mesmo tipo de silvicultura. É recomendada prudência na utilização de tabelas de produção ou modelos de crescimento fora das zonas que serviram para a sua elaboração (Rondeux e Thibaut, 1996).

As tabelas de produção ditas normais são geralmente previstas para um “grau de coberto” normal sendo este correspondente à relação existente entre a área basal de um povoamento “observada” (expressão da sua densidade) e a área basal “teórica” dada pela tabela. O grau de ocupação é considerado “normal” quando é igual à unidade, ou seja, quando o povoamento em análise possui uma área basal idêntica à da tabela, para a mesma idade (Rondeux e Thibaut, 1996). Na prática, se o grau de coberto observado no povoamento ao qual se deseja aplicar a tabela normal está compreendido entre 0,8 e 1,5 (Bartet et Pleines, 1972), é recomendado recorrer a correcções sob a forma de factores multiplicativos destinados a corrigir as diferenças de densidade. Assim, os valores estimados pela tabela para a mesma idade e nível de fertilidade serão corrigidos com a aplicação de um factor correspondente à razão entre a área basal do povoamento em estudo e a área basal teórica dada pela tabela. Serão alvo de ajustamento os valores relativos ao volume do povoamento principal mas não os acréscimos em área basal ou em volume.

A utilização de uma tabela de produção para apoio à gestão florestal pressupõe a disponibilidade de informação relativa à idade, nível de produtividade dado pela classe de qualidade e densidade do povoamento ao qual se pretende aplicar.

Qualquer que seja o grau de resolução os modelos de crescimento visam ajudar o Técnico a gerir a sua floresta.

## 7.2. ELABORAÇÃO DA TABELA DE PRODUÇÃO

### 7.2.1. Equação de predição para o diâmetro quadrático médio

O diâmetro médio de um povoamento é função do espaço de crescimento médio disponível para cada árvore e da classe de qualidade da estação em que esta se encontra instalada (Oliveira, 1995). O diâmetro médio corresponde ao diâmetro da árvore de área basal média. Para a obtenção de uma equação que permita estimar o diâmetro médio foram testadas as seguintes funções:

$$\text{EDM1: } dg = \beta_0 + \beta_1 hdom + \beta_2 \frac{1}{\sqrt{N}};$$

$$\text{EDM2: } dg = \beta_0 + \beta_1 hdom + \beta_2 \frac{1}{N};$$

$$\text{EDM3: } dg = \beta_0 + \beta_1 hdom + \beta_2 \ln N;$$

$$\text{EDM4: } dg = \beta_0 + \beta_1 hdom + \beta_2 t + \frac{\beta_3}{\sqrt{N}} + \beta_4 t^2.$$

Os dados utilizados para o ajustamento das equações de diâmetro médio são provenientes das mesmas parcelas utilizadas na modelação da curva hipsométrica geral (*vide* Capítulo III, ponto 3.1.2.). O ajustamento das funções apresentadas acima ao conjunto de dados foi efectuado com base no método dos mínimos quadrados ordinários (*OLS*). Para tal, recorreu-se ao procedimento *PROC REG* do programa *SAS/STAT*. Também aqui o ajustamento e consequente verificação dos pressupostos pôs em evidência a não normalidade dos resíduos e a heterocedasticidade dos mesmos, pelo que se seguiu um procedimento em tudo semelhante ao usado nos capítulos anteriores, em condições análogas. Assim, recorreu-se à regressão dos mínimos quadrados lineares ponderada iterativamente “*iteratively reweighted least squares*” (*IRWLS*) com recurso à função de *Huber* com um valor limite de  $r = 1$ .

Em virtude da heterogeneidade da variância detectada através da análise dos resíduos studentizados, os quais demonstraram um padrão comum de variação crescente com o aumento dos valores da variável dependente (*dg*), foi utilizado um factor de ponderação igual ao inverso da altura dominante ( $1/hdom$ ) a qual faz parte das variáveis independentes dos modelos ajustados.

A qualidade do ajustamento foi avaliada através da significância e estabilidade dos parâmetros, do quadrado médio do erro ponderado do modelo (*QMR*) e do  $R^2$  ajustado ( $R^2_{ajust}$ ). No que se refere à precisão e enviesamento dos modelos foi

considerado: o  $R^2$  de predição ( $R^2_{pred}$ ), a média dos resíduos *PRESS* ( $mPRESS$ ) e a média do valor absoluto dos resíduos *PRESS* ( $maPRESS$ ), os gráficos dos resíduos studentizados em função do diâmetro médio estimado e de detecção de normalidade com base nos gráficos em papel de probabilidades normal “QQ plot” dos resíduos studentizados e valores dos percentis 95 % ( $P95$ ) e 5 % ( $P5$ ). Para além destas estatísticas foi analisada a presença de colinearidade com base no factor de inflação da variância (*VIF*).

No Quadro 7.1 são apresentadas algumas das estatísticas de ajustamento e predição utilizadas na selecção dos modelos.

Quadro 7.1: Estatísticas de ajustamento, precisão e enviesamento dos modelos de predição para o diâmetro quadrático médio, após ponderação pela função influência de *Huber* com  $r=1$  e  $1/hdom$ .

Modelo	QMR	$R^2_{ajust}$	mPRESS	maPRESS	$R^2_{pred}$	P95	P5	VIF
EDM1	0,295	0,960	0,095	1,626	0,936	4,711	-4,947	1,605
EDM2	0,281	0,961	0,064	1,666	0,929	5,297	-5,877	1,626
EDM3	0,331	0,955	0,070	1,707	0,934	4,288	-4,613	1,499
EDM4	0,250	0,967	-0,054	1,509	0,956	2,436	-5,539	34,387

P95, percentil 95; P5, percentil 5; mPRESS e maPRESS, média e média do valor absoluto dos resíduos *PRESS*; QMR, quadrado médio dos resíduos; VIF, factor de inflação da variância.

Dos modelos apresentados no Quadro 7.1 o modelo *EDM4* ajusta-se melhor que os restantes, contudo apresenta elevada colinearidade. Os modelos *EDM1* e *EDM2* têm comportamentos bastante semelhantes, porém, os gráficos de resíduos studentizados do modelo *EDM2* são ligeiramente piores do que os gráficos de resíduos studentizados do modelo *EDM1*. Assim, seleccionamos como modelo final para a predição do diâmetro quadrático médio o modelo *EDM1*:

$$dg = -8,3952 + 1,3007hdom + 230,6098 \frac{1}{\sqrt{N}}$$

Esta equação estima o diâmetro quadrático médio *dg* (cm), em função da altura dominante do povoamento *hdom* (m) e do número de árvores por hectare *N*.

## 7.2.2. Modelação da linha de mortalidade natural

A modelação da linha de mortalidade natural foi baseada nos dados dos povoamentos adultos de Bornes, Marão e Padrela. Numa primeira fase analisou-se o

gráfico da relação  $\ln(N)=f(\ln(dg))$  relativo aos povoamentos previamente mencionados a que se juntaram as parcelas puras de castanheiro do ensaio de Bemlhevai. Esta análise teve como objectivo a identificação dos povoamentos que se encontravam numa situação de sublotação. Os nossos povoamentos foram comparados com os dados das tabelas de produção inglesas para a faia, recomendadas para utilização em castanheiro (Hamilton e Christie, 1971), tabela de produção para plantações de castanheiro (Maw, 1912) correspondente à melhor classe de qualidade, apresentada por Everard e Christie (1995) e ainda com os dados da tabela de produção provisória para o castanheiro no sul de Inglaterra (Everard e Christie, 1995). A Figura 7.1 mostra a relação  $\ln(N)=f(\ln(dg))$  para todos os dados disponíveis, incluindo a faia e o castanheiro em Inglaterra.

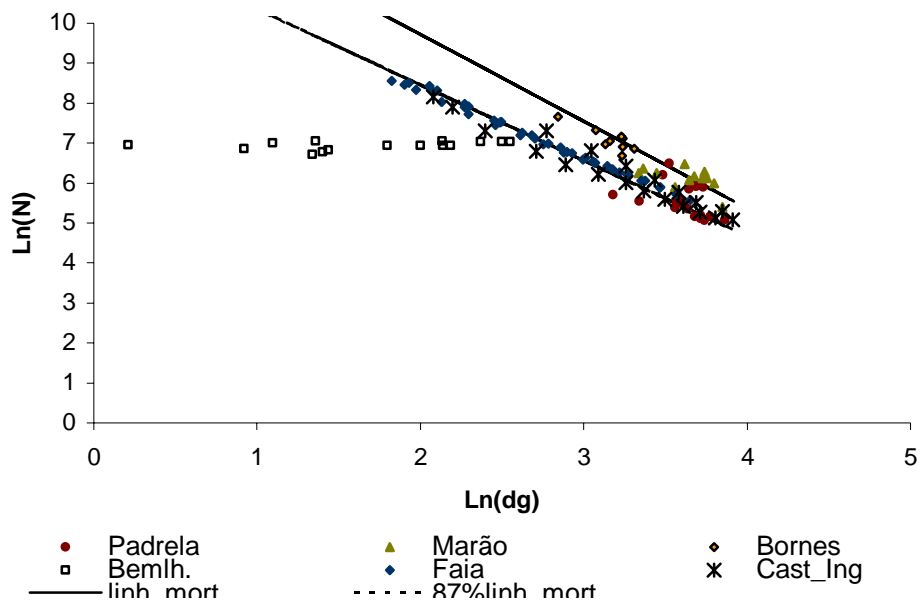


Figura 7.1: Relação entre o logaritmo do número de árvores por hectare  $N$  em função do logaritmo do diâmetro médio  $dg$ , para os dados disponíveis.

Como se pode observar Bemlhevai encontra-se numa situação nítida de sublotação e portanto, longe da linha de mortalidade natural. Por outro lado, os povoamentos de Bornes e Março ultrapassam a linha de mortalidade natural da faia e castanheiro em Inglaterra que corresponde a 87 % da linha de mortalidade natural em Portugal. Por sua vez, a Padrela aproxima-se destes últimos encontrando-se portanto sublotada.

Seguidamente ajustaram-se as funções correspondentes à linha de mortalidade natural, quer em função do diâmetro médio ( $dg$ ), quer em função da altura dominante

(*hdom*). A linha de mortalidade apresentada no gráfico foi obtida através da equação que a seguir se apresenta:

$$\ln(N) = 14,07526 - 2,17687 \ln(dg), \text{ com}$$

$$QMR = 0,0703 \quad R^2 = 0,8973 \quad R^2_{ajust} = 0,8871$$

Esta equação resultou do ajustamento do número de árvores por hectare *N* em função do diâmetro médio *dg* sob a forma logarítmica, para os pontos de maior densidade para cada valor de *dg* (n=12 pontos). Relativamente à variável *hdom* não foi possível obter qualquer relação entre esta variável e o número máximo de árvores por hectare.

### 7.2.3. Equação de predição para o volume total do povoamento

A estimação do volume total por hectare pode ser realizada através de uma equação para a zona em estudo onde o volume por hectare é função da altura dominante do povoamento. Assim, para o desenvolvimento de uma equação que traduza a relação *volume total* = *f(hdom)*, foram testadas as seguintes funções:

$$\text{EVha1: } \ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{hdom};$$

$$\text{EVha2: } \ln(V) = \beta_0 + \beta_1 hdom;$$

$$\text{EVha3: } \ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \ln(hdom).$$

Numa primeira fase foram analisados os dados relativos às parcelas dos povoamentos adultos de Bornes, Marão, Padrela (parcelas *A*, *B* e povoamento *C*) e Bemlhevai (parcelas de castanheiro puro). A Figura 7.2 ilustra graficamente a relação *volume total* = *f(hdom)*, bem como a posição dos diversos ensaios. Também aqui é visível a sublotação das parcelas de castanheiro do ensaio de Bemlhevai.

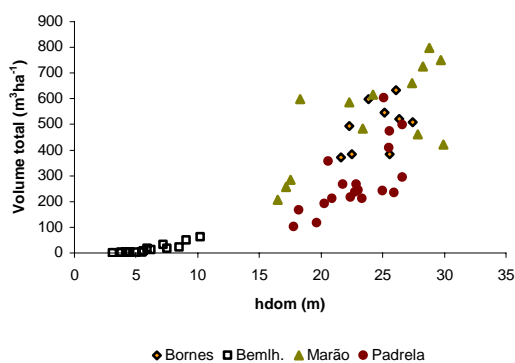


Figura 7.2: Dados das parcelas de castanheiro para a modelação da relação volume total em função da altura dominante.

Para além da definição da linha de mortalidade natural analisou-se também a densidade do coberto através do coeficiente de espaçamento ( $C_e$ ) dos povoamentos referidos, calculado da seguinte forma (Natividade, 1990):

$$C_e = \sqrt{\frac{10000}{N}} \frac{1}{dcopa}, \text{ onde}$$

- $N$  é o número de árvores por hectare;
- $dcopa$  o diâmetro médio da projecção horizontal da copa.

O compasso médio entre árvores é obtido multiplicando o coeficiente de espaçamento pelo diâmetro de projecção da copa. Segundo o autor o espaçamento desejável entre as copas do sobreiro, para que não contactem nem sejam prejudicadas em termos de luz, não pode ser superior a 25 % do diâmetro da sua projecção, o que corresponde a um coeficiente de espaçamento de 1,25. Como no nosso caso nos interessa ter uma noção da densidade do coberto que se aproxime da sua lotação, consideraram-se como subplotadas todas as parcelas com um  $C_e > 0,8$ . Por esta razão não foram considerados os dados de Bemlhevai no ajustamento da relação  $\text{volume total} = f(\text{hdom})$ .

Definido o ficheiro de dados, procedeu-se ao ajustamento dos modelos com recurso ao procedimento *PROC REG* do programa *SAS/STAT*.

A selecção do melhor modelo de predição do volume do povoamento foi efectuada a partir da análise das suas propriedades estatísticas de ajustamento, predição e comportamento adequado do ponto de vista biológico.

Os parâmetros  $\beta_0$  e  $\beta_1$  foram expressos como uma função linear do índice de qualidade da estação ( $SI_{45}$ ), o qual com os dados acima referidos não se mostrou significativo. O modelo obtido que a seguir se apresenta conduz a uma subestimação do volume total nas primeiras idades uma vez que estima valores inferiores aos do povoamento principal:

$$\ln(V) = 8,84927 - 67,22606 \frac{1}{hdom} \quad (1)$$

$$QMR = 0,0918 \quad R^2 = 0,5506 \quad R^2_{ajust} = 0,5327 \quad n = 27$$

Esta mesma função foi ajustada aos povoamentos próximos da linha de mortalidade natural (povoamentos de Bornes, Marão e Padreira *A* e *B*) tendo-se obtido a seguinte função:

$$\ln(V) = 7,78329 - 38,12030 \frac{1}{h_{dom}} \quad (2)$$

$$QMR = 0,0411 \quad R^2 = 0,6559 \quad R^2_{ajust} = 0,6387 \quad n = 22$$

Esta equação é superior à anterior em termos de desempenho mas ainda não permite efectuar desbastes nas primeiras idades nas classes de qualidade inferiores. Assim, apresenta-se a função  $EV_{ha3}$  ajustada ao mesmo conjunto de dados. Esta equação que a seguir se apresenta permite efectuar desbastes nas primeiras idades:

$$\ln(V) = 1,94065 \ln(h_{dom}), \quad (3)$$

$$QMR = 0,0446 \quad R^2 = 0,9989 \quad R^2_{ajust} = 0,9988 \quad n = 22$$

A variável *SI*, embora significativa, não foi incluída uma vez que a forma das curvas não era razoável do ponto de vista biológico e as predições obtidas não eram as melhores.

Uma vez que os modelos obtidos com os dados dos nossos povoamentos de castanheiro têm algumas limitações, devido ao seu reduzido número, foram testadas outras possibilidades para obtenção do volume total. Assim, testou-se o volume total apresentado pelas tabelas de produção inglesas para a faia e recomendadas para utilização em castanheiro (Hamilton e Christie, 1971), quer em separado quer juntamente com os dados do castanheiro. Na Figura 7.3 é apresentada a relação  $volume\ total=f(h_{dom})$  para a totalidade dos dados onde se pode observar a posição das diversas origens de dados.

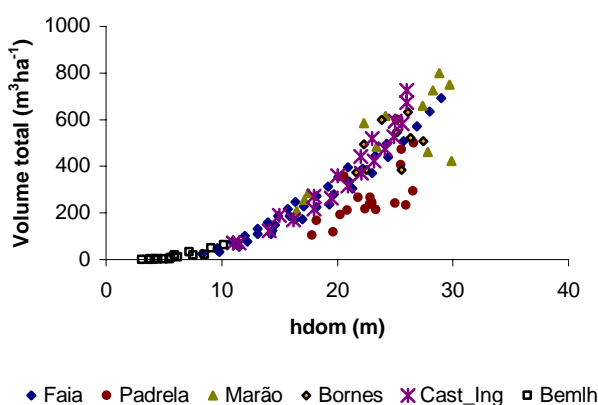


Figura 7.3: Comparação do volume total em função da altura dominante das parcelas de castanheiro nacionais com a faia e castanheiro em Inglaterra.

Como se pode observar na Figura 7.3 os povoamentos de Borne earão sobrepõem-se razoavelmente em termos de volume total com a faia e castanheiro dado pelas tabelas de produção inglesas. Por outro lado, o volume total da maioria das parcelas da Padrela está bastante abaixo das restantes, devido à sua menor densidade.

A análise da distribuição do volume total com a idade apresentada na Figura 7.4, confirma a sobreposição dos dados ingleses com os nossos, muito embora não correspondam ao mesmo leque de classes de qualidade. Como se pode observar a classe de produtividade inferior da faia situa-se abaixo da menor classe de qualidade para o castanheiro e por esta razão não foi considerada. As melhores classes de qualidade observadas em Portugal (26 e 28) não têm correspondente nas tabelas de produção inglesas da faia.

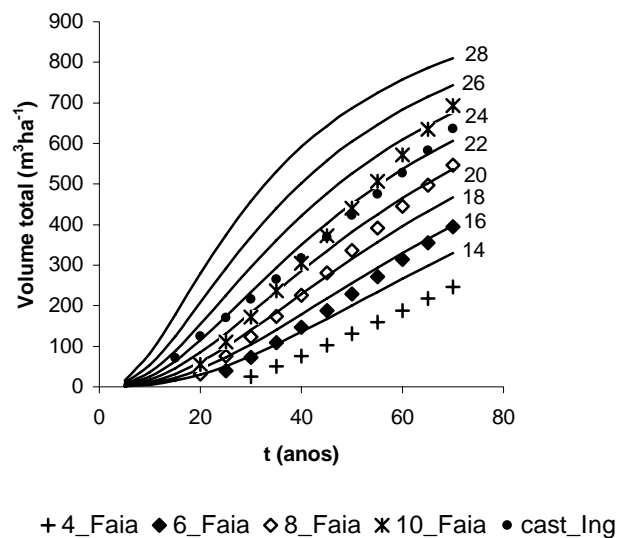


Figura 7.4: Comparação do volume total estimado para o castanheiro com a equação (3) com o volume total estimado pelas tabelas de produção inglesas (faia e castanheiro).

Assim, o ajustamento do modelo *EVhal* aos nossos dados, com  $Ce \leq 0,8$ , juntamente com os volumes da faia, provenientes das tabelas de produção inglesas, conduziu igualmente a uma subestimação do volume total nas primeiras idades. A melhor equação é conseguida quando se consideram apenas os dados dos povoamentos de Borne, Marão e Padrela (parcela A e B) com maior densidade (eq.

2). No entanto, as curvas de volume total têm pior forma relativamente à equação (1), como se pode ver na Figura 7.5, além de continuar a subestimar o volume nas primeiras idades, nas classes de qualidade mais baixas.

Para além dos dados da faia foram considerados também os dados do volume total da tabela de produção para plantações de castanheiro (Maw, 1912) correspondente à melhor classe de qualidade, apresentada por Everard e Christie (1995). Consideram-se igualmente os volumes totais da tabela de produção provisória para o castanheiro no Sul de Inglaterra (Everard e Christie, 1995).

A equação de volume total que a seguir se apresenta foi conseguida através do ajustamento do modelo *EVha3* aos dados (Bornes, Marão, Padrela, parcela *A* e *B*, faia e castanheiro em Inglaterra), com 74 observações:

$$\ln(V) = -1,90227 + 2,53771 \ln(hdom), \quad (4)$$
$$QMR = 0,0305 \quad R^2 = 0,9452 \quad R^2_{ajust} = 0,9444 \quad n = 74$$

Qualquer uma das equações apresentadas permite estimar o volume total ( $m^3 ha^{-1}$ ) a partir da altura dominante do povoamento ( $m$ ).

Os parâmetros  $\beta_0$  e  $\beta_1$  foram expressos igualmente como uma função linear do índice de qualidade da estação ( $SI_{45}$ ). A inclusão desta variável, ainda que significativa, levava à previsão de alguns volumes saídos em desbaste negativos, pelo que não foi considerada. No entanto, como a altura dominante atingida a uma determinada idade é função da classe de qualidade, indirectamente está também a considerar-se a classe de qualidade. Assume-se que a uma dada altura dominante corresponde um determinado volume total (Assmann, 1970).

Na Figura 7.5 é apresentada a comparação das equações (1) e (2). A equação (1) foi obtida com os dados do castanheiro ( $Ce \leq 0,8$ ) e a equação (2) com estes mesmos dados mas considerando somente, no caso da Padrela, as parcelas *A* e *B* com maior densidade.

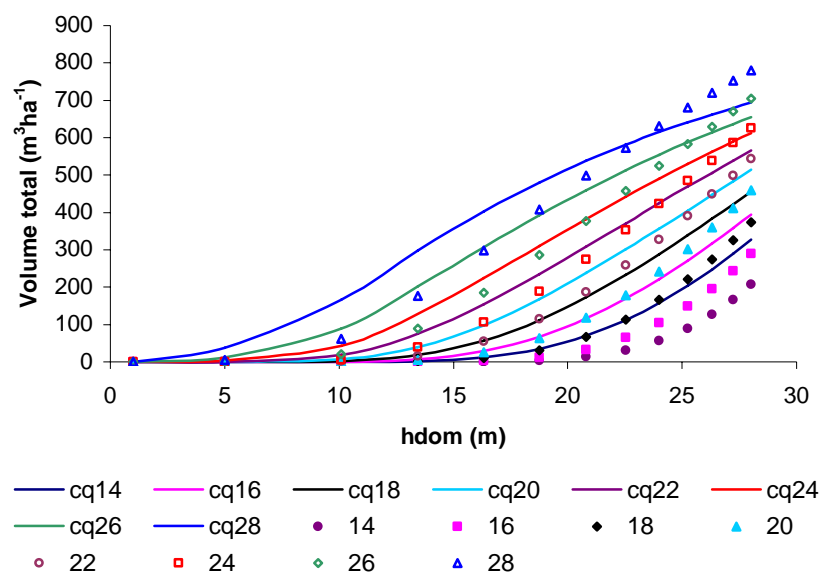


Figura 7.5: Comparação das curvas de volume total obtidas com as equações (1), pontos, e (2), a cheio, em termos da sua adequação ao crescimento biológico.

Como se pode observar a equação (1) apresenta melhor forma mas estima valores demasiado baixos nas menores classes de qualidade e nas alturas dominantes mais baixas, relativamente à equação (2). Este comportamento leva a subestimas do volume total nas primeiras idades e conseqüentemente os desbastes ocorrem muito tardiamente. O modelo (2), nesse aspecto é superior ao (1), porque apesar de manter essa tendência nas classes de qualidade inferiores, os desbastes ocorrem mais cedo.

Na Figura 7.6 faz-se a mesma comparação para os modelos (3) e (4), previamente apresentados. O modelo (3) foi obtido com os dados dos povoamentos de Borne, Marão e Padrela A e B, e o (4) com estes dados em conjunto com os dados da faia e castanheiro em Inglaterra. A inclusão dos dados das tabelas inglesas proporciona a melhoria da forma das curvas do volume total do modelo (4) relativamente ao (3). Qualquer destas equações permite desbastar a partir dos 15 anos em todas as classes. A sobreposição do volume total das parcelas de castanheiro com maior densidade com os volumes observados nas tabelas inglesas leva-nos a optar pela equação (4), obtida com um maior número de observações e com predições mais realistas.

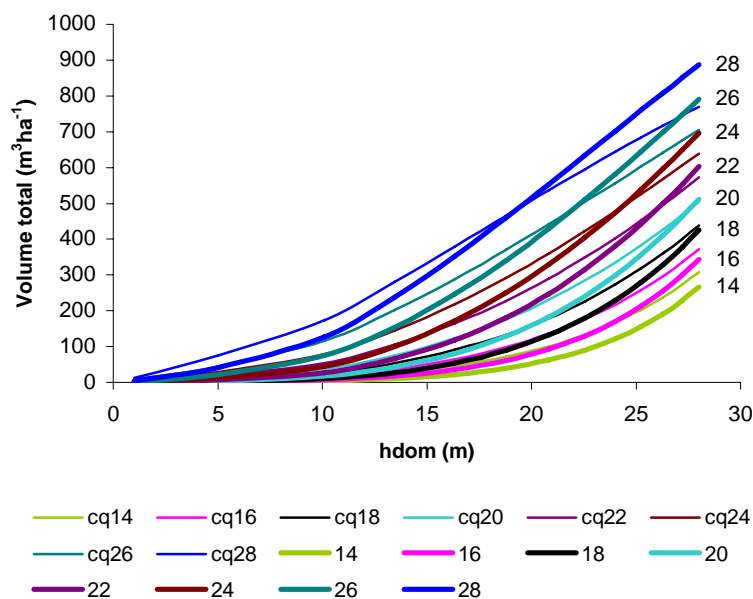


Figura 7.6: Comparação das curvas de volume total obtidas com as equações (3), linha — e (4), linha —, em termos da sua adequação ao crescimento biológico.

#### 7.2.4. Implementação da tabela de produção provisória para o castanheiro

A tabela de produção para o castanheiro foi desenvolvida com base nos seguintes modelos:

##### *Curvas de classe de qualidade*

O modelo McDill-Amateis seleccionado no Capítulo II foi utilizado para a definição das classes de qualidade. A função utilizada é a seguinte:

$$hdom_2 = \frac{34,8559}{1 - \left(1 - \frac{34,8559}{hdom_1}\right) \left(\frac{t1}{t2}\right)^{1,6160}} \Leftrightarrow hdom = \frac{34,8559}{1 - \left(1 - \frac{34,8559}{SI}\right) \left(\frac{45}{t2}\right)^{1,6160}}$$

Na Figura 7.7 comparam-se as classes de qualidade para o castanheiro em Portugal com a faia e o castanheiro em Inglaterra, uma vez que estes são os únicos dados disponíveis conhecidos. Por outro lado, as tabelas inglesas da faia têm sido usadas para estimar o crescimento do castanheiro em Portugal. Como se pode observar a classe de produtividade 4 para a faia fica aquém da classe de qualidade inferior definida para o castanheiro. Por sua vez à classe de produtividade 8 da faia corresponde sensivelmente a classe de qualidade 20 do castanheiro. Para as restantes classes não existe qualquer correspondência.

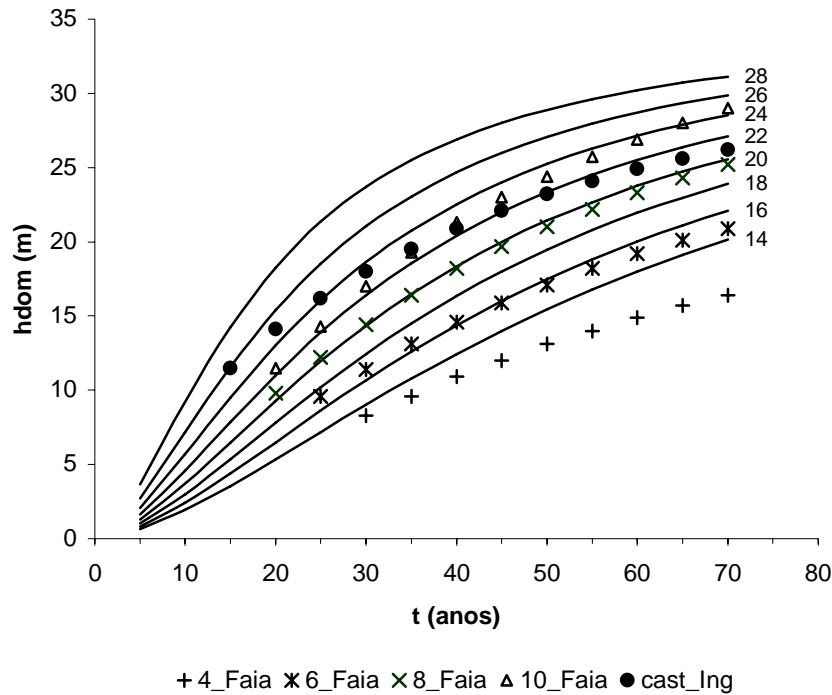


Figura 7.7: Comparação das classes de qualidade definidas para o castanheiro em Portugal com as classes de produtividade das tabelas de produção inglesas (faia e castanheiro).

### ***Relação hipsométrica geral***

O diâmetro quadrático médio das dominantes é uma variável que demonstrou uma boa prestação na modelação da relação hipsométrica geral, todavia não está disponível na tabela de produção pelo que não pôde ser utilizado. Assim, a relação hipsométrica geral empregue não corresponde aos modelos finais seleccionados no Capítulo III (*PI* e *PIa*), uma vez que qualquer destas funções tem como variável independente o diâmetro dominante. O modelo utilizado corresponde ao modelo *HI* uma vez que é a única função obtida que não inclui o diâmetro dominante. Contudo esta função aproxima-se, em termos de qualidade de ajustamento e predição, dos modelos seleccionados.

A relação hipsométrica seleccionada para a tabela de produção foi a seguinte:

$$h = h_{dom}(1 + 0,0607e^{-0,0228 h_{dom}})(1 - e^{-1,6676 d/h_{dom}})$$

### ***Relação do volume total em função da altura dominante***

Para a definição do volume total em função da altura dominante foi utilizada a equação (4) seleccionada no ponto 7.2.3.:

$$\ln(V) = -1,90227 + 2,53771 \ln(h_{dom})$$

### ***Equação de predição para o diâmetro quadrático médio***

Para a predição do diâmetro quadrático médio foi utilizado o modelo seleccionado na secção 7.2.1.:

$$dg = -8,3952 + 1,3007h_{dom} + 230,6098 \frac{1}{\sqrt{N}}$$

Para facilitar a utilização da tabela de produção estas equações foram implementadas num ficheiro *EXCEL*. Neste ficheiro o utilizador pode definir a gestão a aplicar - determinação do regime de desbastes - da seguinte forma:

1. Fazendo uso do modelo de redução de densidade que a seguir se apresenta, bastando para isso definir o número de árvores inicial e a idade do primeiro e último desbastes:

$$N_2 = N_1 \exp(-0,0155 SI (t_2 - t_1) - 0,1316 SI \ln(t_2/t_1)) \quad EM = 0,9853$$

No ajustamento desta função foram usados os dados das tabelas de produção inglesas do castanheiro. Para a obtenção desta equação foram testadas várias alternativas, quer somente com os dados das parcelas permanentes de Bornes, Bemlhevai e Marão, mas também em conjunto com os dados das tabelas inglesas da faia e castanheiro. Em alternativa testou-se a utilização do factor de *Wilson* o qual não se mostrou adequado para a obtenção de densidades aceitáveis para condução do castanheiro.

2. Definição da densidade pretendida de acordo com a altura dominante. É necessário definir a idade do primeiro e último desbaste.

Para utilização desta segunda opção com vista à produção de madeira de qualidade sugere-se a utilização de modelos de gestão com aplicação de desbastes em proveito das árvores de futuro. O crescimento em diâmetro das árvores designadas deverá ser igual ou superior a  $1 \text{ cm ano}^{-1}$  (Bourgeois *et al.*, 2004). Segundo estes autores a produção de madeira de qualidade repousa sobre a cultura “individual” de árvores de futuro, cuidadosamente seleccionadas, desbastadas e desramadas na devida altura. Sugerem um número de árvores que poderá ser conduzido até corte final à volta das 200 a 250 árvores por hectare, para o objectivo de produção de fustes com 35-40 cm de diâmetro a 1,30 m aos 40 anos, aproximadamente, ou 120 a 175 árvores por hectare para a obtenção de fustes de 45-50 cm de diâmetro a 1,30 m aos 50 anos, aproximadamente. Este objectivo só será atingido nas estações correspondentes às melhores classes de qualidade, arborizadas com plantas de primeira qualidade de proveniência apropriada.

A fim de se contribuir para a gestão adequada das áreas instaladas, ou a instalar, com esta espécie, em regime de alto fuste, apresenta-se no Quadro 7.2 um modelo de condução silvícola para produção de madeira de qualidade.

Quadro 7.2: Modelo para condução duma plantação de castanheiro em regime de alto fuste em povoamento florestal.

Altura (m)	Idade (anos)	d das árv. designadas (cm)	Intervenções	N após desbaste *
0,40	1 + 0		• Preparação do terreno • Plantação	1250
0,60 - 5			• Lavouras • Cortes de formação	
7 - 9			• Último corte de formação • Limpeza • 1ª desrama até 2 m (300 árv.)	1000 a 1100
11 - 12	13 - 16	15	• Designar 150 a 250 árv. • 1º desbaste • Desrama até 4 m das designadas	≈ 700
14 - 16	18 - 21	20	• 2º desbaste • Desrama até 6 m das designadas	≈ 370
18 - 20	27 - 30	30	• 3º desbaste	250
20 - 24	35 - 40	35 - 40	• Objectivo d 35 a 40 cm: corte raso ou • 4º desbaste	0 ou 150 - 180
24 - 26	40 - 45	≥ 45	• Objectivo d 45 cm: corte raso	0

Adaptado de Bourgeois *et al.* (2004). \* Densidade indicativa.

Os autores propõem ainda uma modificação do modelo de condução apresentado que consiste em efectuar uma limpeza mais forte igualmente aos 7 a 9 m de altura por volta dos 8 a 12 anos de idade, com uma redução da densidade para cerca de 600 árvores por hectare. Neste caso o primeiro desbaste deverá ocorrer mais tarde quando as árvores atingirem 13 a 14 m de altura o que acontecerá por volta dos 18 a 20 anos, com a vantagem do material retirado poder ser comercializável. Nesta fase reduz-se o número de árvores para cerca de 370, reduzindo posteriormente para 250 e finalmente para 180, mantendo contudo o mesmo objectivo final. Esta opção é mais arriscada caso não exista um sub-bosque instalado.

Os modelos apresentados poderão servir de orientação ao utilizador final das tabelas de produção do castanheiro com vista à definição do regime de desbastes pretendido e conseqüentemente da produção esperada.



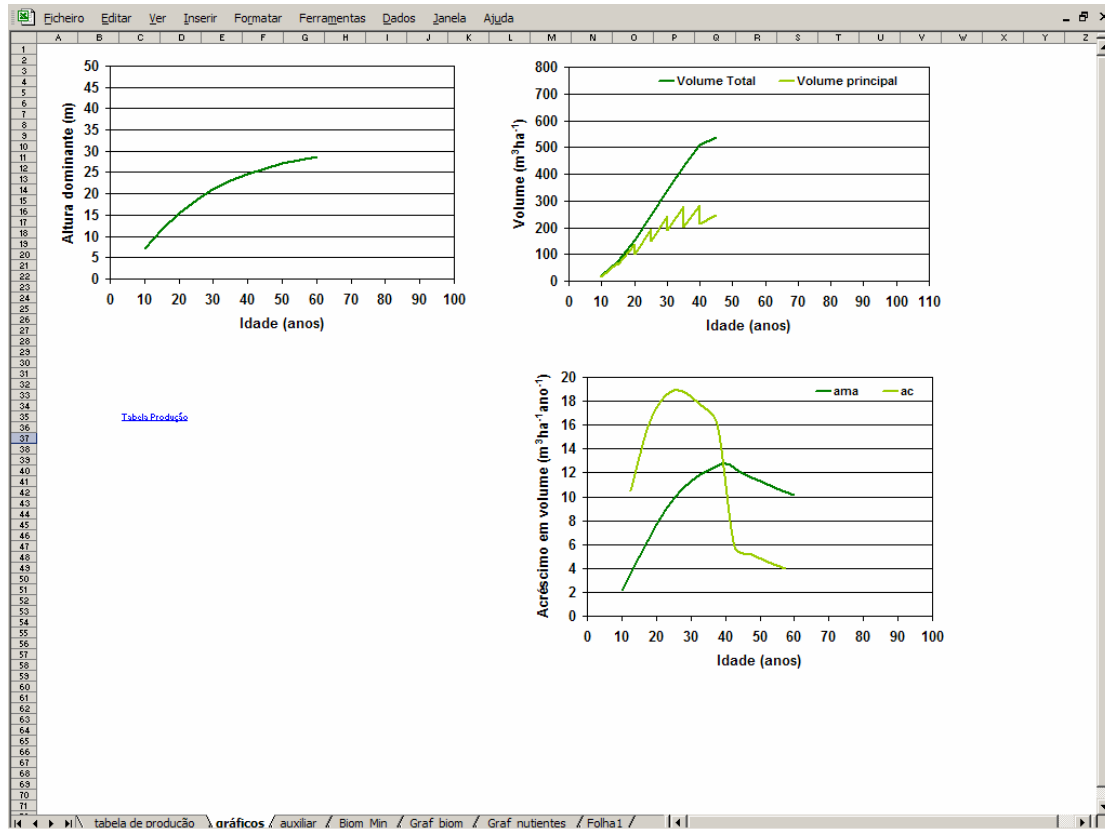


Figura 7.9: Visualização gráfica correspondente à silvicultura definida na tabela de produção baseada no modelo de condução proposto por Bourgeois *et al.* (2004).

A silvicultura utilizada na melhor classe de qualidade conduziu a uma perda de volume total em detrimento do aumento da qualidade individual.

Esta tabela de produção fornece também a biomassa, carbono e nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S e B) correspondentes à silvicultura definida. Na Figura 7.10 é apresentada a estimativa da biomassa produzida e do carbono armazenado com a silvicultura aplicada na tabela de produção apresentada. Nas Figuras 7.11 e 7.12 são apresentados os gráficos dos valores acumulados da biomassa e do carbono produzidos bem como dos elementos minerais *N*, *P*, *K*, *Ca*, *Mg*, *S* e *B*. Para a obtenção da estimativa da biomassa foram usadas as equações obtidas no Capítulo V, resultantes do ajustamento em simultâneo, enquanto para os elementos minerais se utilizou a concentração média de cada elemento por componente da biomassa.



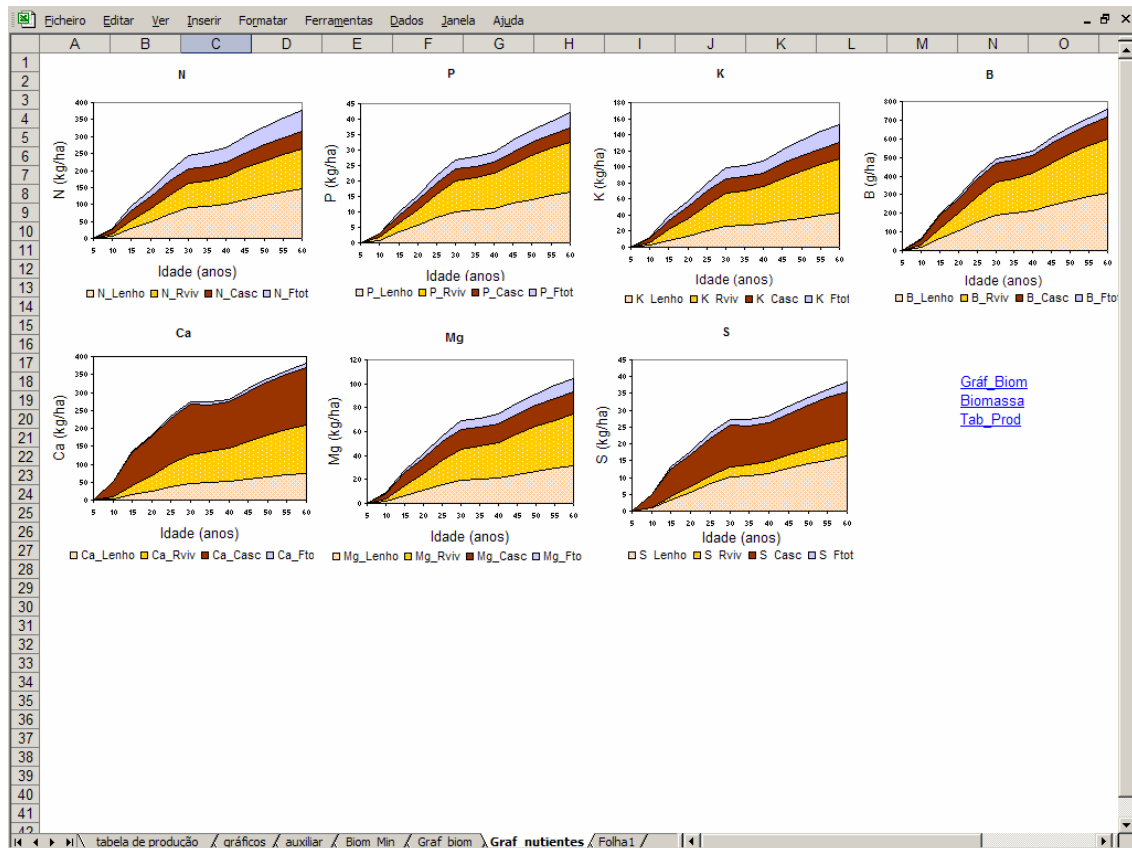


Figura 7.12: Estimativa da quantidade de  $N$ ,  $P$ ,  $K$ ,  $Ca$ ,  $Mg$ ,  $S$  e  $B$  acumulados, correspondente à silvicultura definida na tabela de produção baseada no modelo de condução proposto por Bourgeois *et al.* (2004), para o povoamento principal.

### 7.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As tabelas de produção apresentadas para o castanheiro em regime de alto fuste tem carácter provisório na medida em que a função de produção em volume total do povoamento não pode ser determinada com exactidão devido ao desconhecimento do volume retirado dos povoamentos ao longo do tempo. É de referir que a área de alto fuste de castanheiro adulto é muito reduzida (7,6 ha, dos quais permanecem em pé apenas 4,7 ha), não permitindo alargar o número de parcelas permanentes para obtenção do volume total e secundário. Esta tabela poderá ser melhorada à medida que novos dados provenientes das parcelas instaladas em povoamentos jovens ficarem disponíveis. Apesar do seu carácter provisório constitui um valioso instrumento para a gestão florestal na medida em que permite obter previsões da produção lenhosa bastante aceitáveis, principalmente para o povoamento principal; efectuar diversas

simulações de tipos de tratamentos silvícolas; escolher a idade óptima de revolução; avaliar e fundamentar propostas de arborização, realizar estimativas financeiras, obter predições do carbono sequestrado nas árvores, bem como dos restantes elementos minerais importantes para a gestão sustentável da floresta.

A tabela destina-se a ser aplicada sobretudo na região de Trás-os-Montes e Entre Douro e Minho onde foram recolhidos os dados para a sua construção. Convém referir que é nesta zona que a espécie tem maior expressão, em termos nacionais.

A tabela de produção obtida fornece diferentes indicações dendrométricas para o povoamento principal após desbaste e para o povoamento secundário, consoante o tipo de silvicultura preconizada (densidade inicial ou densidade em função da altura dominante atingida numa determinada idade, início e periodicidade de desbaste). Os indicadores de produtividade globais são a produção total em volume, o acréscimo médio anual e o acréscimo corrente também em volume. Relativamente à densidade esta poderá ser definida pelo utilizador de acordo com a silvicultura pretendida para atingir determinado objectivo de produção ou pela utilização de uma equação de redução de densidade, bastando para isso definir apenas a densidade inicial. Assim, recomenda-se a utilização do modelo de condução teórico proposto por Bourgeois *et al.* (2004) para definir a silvicultura a aplicar na melhor classe de qualidade ( $SI_{45}=26$ ), onde existe potencial para produção de madeira de categoria superior, uma vez que somente nestas condições é possível satisfazer os requisitos propostos pelos autores para atingir este objectivo. Este tipo de silvicultura conduz a uma perda de volume total em detrimento do aumento da qualidade individual.

Nas restantes classes de qualidade aconselha-se, para facilitar a sua aplicação, o recurso a um modelo de redução de densidade que traduz a silvicultura das tabelas de produção inglesas para o castanheiro, uma vez que não existem dados disponíveis, entre nós, que nos permitam obter uma equação com melhores predições. Em alternativa testou-se a utilização do factor de *Wilson Fw* ( $Fw=100/(\sqrt{N} * h_{dom})$ ) o qual não se mostrou adequado para a obtenção de densidades aceitáveis para condução do castanheiro. As tabelas apresentadas têm por base estas recomendações.

Esta tabela de produção fornece também a biomassa, carbono e nutrientes: *N*, *P*, *K*, *Ca*, *Mg*, *S* e *B*, correspondentes à silvicultura definida, tanto para o povoamento principal como para o povoamento secundário, muito embora com algumas limitações neste último caso devido à falta de informação relativa aos desbastes.

## 8. CONCLUSÕES

No decorrer deste trabalho fez-se uma análise da potencialidade produtiva do castanheiro em regime de alto fuste na região de Trás-os-Montes e Entre Douro e Minho. Usaram-se, para isso, dados dos povoamentos adultos existentes e de povoamentos jovens.

Nesta análise constatou-se que o acréscimo médio em diâmetro das árvores dominantes dos povoamentos adultos estudados foi, em média, de  $0,70 \text{ cm ano}^{-1}$  aos 45 anos, tendo-se observado acréscimos médios de  $0,64 \text{ cm ano}^{-1}$  em Bornes,  $0,69 \text{ cm ano}^{-1}$  no Marão e  $0,73 \text{ cm ano}^{-1}$  na Padrela. Observou-se também um acréscimo médio em altura das árvores dominantes de  $0,46 \text{ m ano}^{-1}$ , em média, igualmente aos 45 anos, tendo-se apurado acréscimos médios de  $0,53 \text{ m ano}^{-1}$  em Bornes,  $0,45 \text{ m ano}^{-1}$  no Marão e  $0,44 \text{ m ano}^{-1}$  na Padrela.

Constatou-se também que os povoamentos do Marão e de Bornes se encontram sobre a linha de mortalidade natural definida para o castanheiro, com uma densidade bastante superior ao recomendado, em face do diâmetro médio observado. Estes povoamentos encontram-se de facto em risco de mortalidade natural sendo esse risco perceptível, principalmente no Marão, onde nos últimos anos morrem árvores sem motivo aparente. Por este facto, é fundamental e urgente intervir nestes povoamentos para redução da densidade através de intervenções culturais adequadas.

Apesar da reduzida área dos povoamentos adultos (7,6 ha no início deste estudo) foi possível obter um modelo de crescimento em altura dominante e estabelecer curvas de classe de qualidade para o castanheiro que ficam agora disponíveis, juntamente com os restantes modelos obtidos, para utilização por parte dos Técnicos e Proprietários florestais para a gestão dos castinçais. As classes de qualidade obtidas permitiram-nos constatar a existência de uma ampla gama de variação no índice de qualidade da estação com um mínimo de 14 e um máximo de 28 m, à idade de referência de 45 anos, o que demonstra diferentes desenvolvimentos em altura dominante e, por isso, diferentes capacidades produtivas das estações. Devido à heterogeneidade dos povoamentos adultos existentes identificaram-se diferentes classes de qualidade no mesmo local. Assim, as acções silvícolas a preconizar para a gestão dos povoamentos deverão ser diferenciadas tendo em vista diversos objectivos de produção de acordo com a potencialidade produtiva desses povoamentos.

A comparação das classes de qualidade definidas para o castanheiro em Portugal com as classes de produtividade das tabelas de produção inglesas (faia e castanheiro) demonstrou que as melhores classes de qualidade observadas entre nós (24, 26, e 28 m) não têm correspondente nas tabelas de produção inglesas. Desta forma a aplicação indiscriminada das tabelas inglesas da faia ao castanheiro em Portugal não é aconselhável, sobretudo nas estações mais produtivas.

Para além da definição de classes de qualidade para o castanheiro obteve-se uma série de equações de predição do crescimento e produção ao nível da árvore individual fundamentais para a gestão dos povoamentos e para os inventários florestais como:

- Função hipsométrica geral, reparametrizada com variáveis representativas dos povoamentos como a densidade e a produtividade da estação, para estimação da altura total das árvores na região em estudo;

- Equações para predição do volume total e por categorias de aproveitamento, com e sem casca, em função de um diâmetro de despona ou de uma altura de despona, assim como uma equação de perfil do tronco que permite estimar diâmetros a níveis superiores do tronco;

- Equações e sistemas de equações para predição da biomassa e mineralomassa, acima do solo, totais e por componentes, importantes para avaliar a biomassa produzida mas também para a gestão sustentada dos povoamentos de castanheiro de forma a adequar as intervenções silvícolas que, como se sabe, podem influenciar o balanço em elementos minerais do solo, afectando os fluxos de entradas e saídas do sistema, ou modificar directamente o armazenamento de elementos minerais no solo. As equações para predição do carbono sequestrado nas árvores são importantes para avaliar a contribuição da mudança para o ciclo de carbono global bem como para determinar a quantidade de carbono potencial que pode ser libertada para a atmosfera, ou conservada e fixada numa determinada área.

- Equações que permitem estimar a biomassa para o tronco principal por categorias de aproveitamento, com e sem casca, em função de um diâmetro ou de uma altura de despona.

Com base nos modelos obtidos estimou-se a biomassa aérea, total e por componentes, dos povoamentos adultos estudados. Assim, a biomassa do lenho predomina, contribuindo com cerca de 70 % da matéria seca. Por sua vez os ramos são responsáveis por cerca de 20 % da matéria seca aérea, logo seguidos da casca,

com 7 a 8 % do total e das folhas e flores com apenas 1,5 %, aproximadamente. No geral, 77 a 78 % da biomassa aérea total do castanheiro em regime de alto fuste é proveniente do tronco principal enquanto 21,5 a 23 % resultam da copa e o mesmo se passa relativamente ao carbono sequestrado.

No que se refere aos elementos: *N*, *P*, *K*, *Ca*, *Mg*, *S* e *B* a sua concentração varia naturalmente com o componente e mineral considerado. Por outro lado, a distribuição da biomassa por componentes difere nitidamente da distribuição da mineralomassa. Por exemplo, se a contribuição da biomassa do lenho para a biomassa aérea total é cerca de 70 %, a sua contribuição para a mineralomassa aérea total não excede os 41 %, à exceção do enxofre que apresenta valores superiores. No oposto, a contribuição das folhas e flores para a mineralomassa total pode atingir os 19 % enquanto que o seu contributo para a biomassa total não excede 1,6 %. Da mesma forma, a casca contribui com 9 a 10 %, no máximo, para a biomassa do tronco e em contrapartida pode ser responsável por cerca de 70 % da mineralomassa do tronco, no caso do cálcio.

As folhas, flores, cascas e raminhos são os componentes da biomassa onde a concentração dos elementos minerais é mais elevada. Contudo, o seu teor em minerais, embora importante, é inferior ao do tronco, com exceção do potássio, devido ao seu reduzido peso na biomassa total.

O desenvolvimento deste trabalho permitiu também obter um modelo de árvore individual independente da distância do tipo *função potencial x função modificadora* para predição do crescimento em diâmetro. Este modelo estima valores do diâmetro com erros muito aceitáveis se considerarmos a assimetria do tronco e a irregularidade da casca, mais notória nas árvores mais velhas onde se verificam os maiores erros. Todavia os erros cometidos são na generalidade dos casos inferiores a 1 cm. Este modelo poderá ser melhorado à medida que se forem obtendo novos dados.

A conjugação de diversas funções obtidas ao longo deste trabalho, relativas ao crescimento e produção, possibilitaram a obtenção de um modelo de crescimento de povoamento do tipo tabela de produção para o castanheiro em regime de alto fuste. Esta tabela fornece as primeiras indicações de crescimento e produção para a espécie na região de Trás-os-Montes e Entre Douro e Minho onde foram recolhidos os dados para a sua construção. Convém referir que é nesta zona que a espécie tem maior expressão, em termos nacionais.

Trata-se de um instrumento valioso para a gestão florestal, apesar de ainda poder ser melhorada, na medida em que passa a ser possível a partir de agora fazer previsões fundamentadas da produção lenhosa e efectuar diversas simulações de tipos de tratamentos silvícolas com eleição da idade óptima de revolução assim como avaliar e fundamentar propostas de arborização, realizar estimativas financeiras, e obter predições do carbono sequestrado nas árvores, bem como dos restantes elementos minerais importantes para a gestão sustentável da floresta.

Esta tabela poderá ser aperfeiçoada à medida que novos dados provenientes das parcelas instaladas em povoamentos jovens ficarem disponíveis.

Os modelos aqui obtidos são, na maioria dos casos, ferramentas únicas importantes para a gestão dos povoamentos existentes, em particular os povoamentos jovens. Apesar do volume de dados utilizado para a sua construção ser relativamente limitado, devido às condicionantes próprias de distribuição da espécie, a sua prestação é de um modo geral bastante boa, sendo os modelos possíveis face aos dados disponíveis. Para colmatar esta lacuna instalaram-se 15 novas parcelas permanentes de 3 000 m<sup>2</sup> cada em plantações jovens para acompanhamento do desenvolvimento da espécie ao mesmo tempo que se lançaram as bases para estudos futuros entre os quais o aperfeiçoamento dos modelos aqui obtidos.

Este trabalho insere-se numa linha de investigação mais alargada que deverá incluir estudos ao nível do solo e da qualidade da madeira. Espera-se, no final, que estes instrumentos contribuam para a análise da sustentabilidade dos sistemas de produção existentes, bem como para aumentar o conhecimento sobre a interdependência entre a produtividade e a qualidade da madeira e sua relação com os factores da estação.

A elaboração de um modelo de produção mais completo e dinâmico só será possível com o acompanhamento e alargamento da rede de parcelas de estudo existentes, à medida que os novos povoamentos forem evoluindo.

## BIBLIOGRAFIA

- AGROCONSULTORES e COBA, 1991. Carta de solos do Nordeste de Portugal, Lisboa.
- ALBUQUERQUE, J. P. M., 1982. Carta Ecológica de Portugal. Comissão Nacional do Ambiente.
- ALEGRIA, C., 1994. Predição de volumes e perfil do tronco para o pinheiro bravo na região de Castelo Branco. Actas 1, III Congresso Florestal Nacional, Figueira da Foz: 38-51.
- ALEMDAG, I. S., 1978. Evaluation of some competition indexes for the prediction of diameter increment in planted white spruce. Can. For. Serv., For. Man. Inst., INF. Rep. FMR-X-108.
- ALEMDAG, I. S., 1991. National site-index and height-growth curves for white spruce growing in natural stands in Canada. Can. J. For. Res., 21: 1466-1474.
- ALLEN, P. J., 1992. Polynomial taper equation for *Pinus caribaea*. N. Z. J. For. Sci. 21: 194-205.
- ALVES, A. A. M., 1988. Técnicas de produção florestal. INIC, 2ª Edição, Lisboa, 334 p.
- AMARO, A., REED, D, TOMÉ, M. e THEMIDO, I., 1998. Modelling dominant height growth: Eucalyptus plantations in Portugal. For. Sci., 44, 1: 37-46.
- AMARO, A., REED, D. D., THEMIDO, I. e TOMÉ, M., 1987. Stand growth modelling for first rotation *Eucalyptus globulus* Labill in Portugal. In "Empirical and process-based models for forest tree and stand growth simulation", Ed. Ana Amaro e Margarida Tomé, Edições Salamandra, Oeiras, Portugal: 99-110.
- AMATEIS, R. L. e BURKHART, H. E., 1989. Diameter increment and survival equations for loblolly pine trees growing in thinned and unthinned plantations on cutover, site-prepared lands. South. J. Appl. For., 13: 170-174.
- AMATEIS, R. L. e BURKHART, H. E., 1987. Cubic-foot volume equations for loblolly pine trees in cutover, site-prepared plantations. South. J. Appl. For., 11: 190-192.

- AMATEIS, R. L. e McDILL, M. E., 1989. Developing growth and yield models using dimensional analysis. *For. Sci.*, 35, 2: 329-337.
- AMATEIS, R. L., 1994. An approach to developing process-oriented growth and yield models. *For. Ecol. Manage.*, 69: 7-20.
- AMIDON, E. L., 1984. A general taper functional form to predict bole volume for five mixed-conifer species in California. *For. Sci.*, 30, 1: 166-171.
- ARNEY, J. D., 1985. A modelling strategy for the growth projection of managed stands. *Can. J. For. Res.*, 15: 511-518.
- ART, H. W. e MARKS, P. L., 1971. A summary table of biomass and net annual production in forest ecosystems of the world. *Maine Agr. Exp. Sta. Misc. Rep.*, 132: 1-132. Cit. Claesson *et al.* (2001).
- ASSMANN, E., 1970. The principles of forest yield study. Trad. Inglês: S. H. Gardiner. Pergamon Press Ltd., Oxford, 506 p.
- AVERY, T. E., 1967. Forest measurements. McGraw-Hill Book Company, New York, 290 p.
- AVERY, T. E., BURKHART, H. E., 1994. Forest Measurements. Fourth edition, McGraw-Hill, Inc, New York, 408 p.
- BAILEY, R. L., 1994. A compatible volume-taper model based on the Schumacher and all generalized constant form factor volume equation. *For. Sci.*, 40, 2: 303-313.
- BARTET, J. H. e PLEINES, W., 1972. Simulation de l'évolution de forêts régulières en fonction du traitement sylvicole. *J. For. Suisse*, 123: 667-695.
- BARTOS, D. L. e JOHNSTON, R. S., 1978. Biomass and nutrient content of quaking aspen at two sites in the Western United States. *For. Sci.*, 24, 2: 273-280.
- BASKERVILLE, G. L., 1965. Dry-matter production in immature balsam fir stands. *Soc. Am. For.*, Wash. DC, *For. Sci. Monogr.* 9. Cit. Wagner e Ter-Mikaelian (1999).
- BATES, D. M. e WATTS, D. G., 1980. Relative curvature measures of nonlinearity. *J. Roy. Stat. Soc. B*, 42: 1-16.
- BEHRE, C. E., 1935. Factors involved in the application of form-class volume tables. *J. Agric. Res.* 51: 669-713. Cit. Husch *et al.* (1982).
- BELCHER, D.W., HOLDAWAY, M. R. e BRAND, G. J., 1982. A description of STEMS – The Stand and Tree Evaluation and Modeling System.

- USDA For. Serv., North Cent. For. Exp. Stn., St. Paul, Minnesota, General Tech. Rep., NC-79; 17 p.
- BENNETT, F. A. e SWINDEL, B. F., 1972. Taper curves for planted slashed pine. USDA For. Serv. Res., Note SE-179, 4 p.
- BENNETT, F. e CLUTTER, J., 1968. Multiple-product yield estimates for unthinned slash pine plantations-pulpwood, sawtimber, gum. USDA For. Serv. Res. Pap., SE-35.
- BIGING, G. S. e DOBBERTIN, M., 1992. A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer trees. *For. Sci.*, 3: 695-720.
- BIGING, G. S. e DOBBERTIN, M., 1995. Evaluation of competition indices in individual tree growth models. *For. Sci.*, 41, 2: 360-377.
- BIGING, G. S., 1984. Taper equations for second-growth mixed conifers of Northern California. *For. Sci.*, 30, 4: 1103-1117.
- BIGING, G. S., 1985 – Improved estimates of site index curves using a varying-parameter model. *For. Sci.*, 31, 1: 248-259.
- BORDERS, B. E., BAILEY, R. L. e CLUTTER, M. L., 1987. Forest growth models: parameter estimation using real growth series. *In* E. R. Ek, S. R. Shifley and T. E. Burk (eds). Proc. IUFRO Conference Forest Growth Modelling and Prediction. Minneapolis, Minnesota: 660-667.
- BORDERS, B. E., BAILEY, R. L. e CLUTTER, M. L., 1988. Forest growth models: parameter estimation using real growth series. *In* Forest Growth Modelling and Prediction. A. R. Ek, S. R. Shifley, and T. E. Burk (eds.). USA For. Serv. Gen. Tech. Rep. NC-120: 660-667.
- BORDERS, B. E., BAILEY, R. L. e WARE, K. D., 1984. Slash pine site index from a polymorphic model by joining (splining) nonpolynomial segments with an algebraic difference method. *For. Sci.*, 30, 2: 411-423.
- BOURGEOIS, C., 1992. Le châtaignier un arbre, un bois. IDF, 1<sup>a</sup> ed., Paris, 331 p.
- BOURGEOIS, C., SEVRIN, E. e LEMAIRE, J., 2004. Le châtaignier un arbre, un bois. IDF, 2<sup>a</sup> ed., Paris, 347 p.

- BOYER, W. D., 2001. A generational change in site index for naturally established longleaf pine on a South Alabama coastal plain site. *South. J. Appl. For.*, 25, 2: 88-92.
- BROWN, S., SATHAYE, J., CANNELL, M. e KAUPPI, P., 1996. Mitigation of carbon emission to the atmosphere by forest management. *Commonwealth For. Rev.*, 75, 1: 80-91.
- BRUCE, D., CURTIS, R. O. e VANCOEVERING, C., 1968. Development of a system of tape rand volume tables for red alder. *For. Sci.*, 14: 339-350.
- BUFORD, M. A., 1986. Height-diameter relationships at age 15 in loblolly pine seed sources. *For. Sci.*, 32, 3: 812-818.
- BURKHART, H. e STRUB, M., 1974. A model for simulation of planted loblolly pine stands. In: Fries, J. (Ed.), *Growth Models for Tree and Stand Simulation*. Royal College Forestry, Res. Not. 30, Stockholm: 128-135.
- BURKHART, H. E., 1977. Cubic-foot volume of loblolly pine to any merchantable top limit. *South. J. Appl. For.*, 1: 7-9.
- BURKHART, H. E., 1997. Development of empirical growth and yield models. In "Empirical and process- based models for forest tree and stand growth simulation", Ed. Ana Amaro e Margarida Tomé, Edições Salamandra, Oeiras, Portugal: 53-60.
- BURKHART, H. E., PARKER, R. C., STRUB, M. R. e ODERWALD, R. G., 1972. Yield of old-field loblolly pine plantations. School of Forestry and Wildlife Resources, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg. Publ. FWS-3-72. Cit. Huang, Titus e Wiens (1992).
- BYRNE, J. C e REED, D. D., 1986. Complex compatible taper and volume estimation systems for red and loblolly pine. *For. Sci.*, 32, 2: 423-443.
- CAO, Q. V., 1993. Estimating coefficients of base-age-invariant site index equations. *Can. J. For. Res.* 23: 2343-2347.
- CAO, Q. V., BALDWIN, Jr., V. C. e LOHREY, R. E., 1997. Site index curves for direct-seeded loblolly and longleaf pines in Louisiana. *South. J. of Appl. For.*, 21, 3: 134-138.

- CAO, Q. V., BURKHART, H. E. e MAX, T. A., 1980. Evaluation of two methods for cubic-volume prediction of loblolly pine to any merchantable limit. *For. Sci.*, 26, 1: 71-80.
- CAO, Q. V., SHIANSONG, L. e MCDILL, M. E., 2002. Developing a system of annual tree growth equations for the loblolly pine – shortleaf pine type in Louisiana. *Can. J. For. Res.*, 32: 2051-2059.
- CARMEAN, W. H. e LENTHALL, D. J., 1989. Height-growth and site-index curves for jack pine in north central Ontario. *Can. J. For. Res.*, 19: 215-224.
- CARMEAN, W. H., 1971. Site index curves for black, white, scarlet and chestnut oaks in the Central States. North Central Forest Experiment Station, U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Research Paper NC-62, 8 p.
- CARMEAN, W. H., 1972. Site index curves for upland oaks in the Central States. *For. Sci.*, 18: 102-120.
- CARMEAN, W. H., HAHN, J. T. e JACOBS, R. D., 1989. Site index curves for forest tree species in the eastern United States. North Central Forest Experiment Station, U. S. Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report NC-128, 15 p.
- CARVALHO, A. P. S. M., 1999. Modelação do crescimento da árvore em eucaliptais em 1ª rotação localizados nas regiões norte e centro litoral. Tese de Doutoramento, UTL-ISA, Lisboa, 369 p. + anexos.
- CARVALHO, J. P. F., 2000. Crescimento, produção e ecologia de povoamentos de *Quercus pyrenaica* Willd. em Portugal continental. Tese de Doutoramento, UTAD, Vila Real, 215 p. + anexos.
- CASTROVIEJO, S., LAÍNIZ, M., LÓPEZ, G. G., MONTSERRAT, P., MUÑOZ, G. F., PAIVA, J. e VILLAR, L., 1990. Flora Ibérica, plantas vasculares de la Península Ibbérica e Islas Baleares. Vol. II, PLATANACEAE-PLUMBAGINACEAE (partim). Real Jardin Botánico, CSIC, Madrid.
- CHEN, H. Y. H., KLINKA, K. e KABZEMS, R. D., 1998. Height growth and site index models for trembling aspen (*Populus tremuloides* Michx.) in northern British Columbia. *For. Ecol. Manage.*, 102: 157-165.

- CHHETRI, D. B. K. e FOWLER, G. W., 1996. Prediction models for estimating total height of tree from diameter at breast height measurements in Nepal's lower temperate broad-leaved forests. *For. Ecol. Manage.*, 84: 177-186.
- CHRISTIE, J. M. e LINES, R., 1975. A comparison of forest productivity in Britain and Europe in relation to climatic factors. Forestry Commission of Great Britain, 34 p. Cit. Rondeux (1993).
- CIESZEWSKI, C. J. e BAILEY, R. L., 2000. Generalized algebraic difference approach: theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. *For. Sci.*, 46, 1: 116-126.
- CIESZEWSKI, C. J. e BELLA, I. E., 1989. Polymorphic height and site index curves for lodgepole pine in Alberta. *Can. J. For. Res.*, 19:1151-1160.
- CIESZEWSKI, C. J., 2002. Comparing fixed and variable base-age site equations having single versus multiple asymptotes. *For. Sci.*, 48, 1: 7-23.
- CLAESSON, S., SAHLÉN, K. e LUNDMARK, T., 2001. Functions for biomass estimation of young *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula spp.* from stands in Northern Sweden with high stand densities. *Scand. J. For. Res.*, 16: 138-146.
- CLUTTER, J. L., 1980. Development of taper functions from variable-top merchantable volume equations. *For. Sci.*, 26, 1: 117-120.
- CLUTTER, J. L., FORTSON, J. C., PIENNAR, L. V., BRISTER, G. H. e BAILAY, R. L., 1983. Timber management a quantitative approach. John Wiley and Sons, New York, 333 p.
- COSTA, R. P. P. R., 1999. Reavaliação de um ensaio de talhadia de *Castanea sativa* na Padrela. Relatório de Estágio, ESAB, Bragança.
- COURBAUD, B., HOULLIER F. e RUPE, C., 1993. Un modèle de croissance en hauteur des arbres en pessière pure irrégulière de montagne. *Ann. Sci. For.*, 50: 337-351.
- CURTIS, R. O., 1964. A stem-analysis approach to site-index curves. *For. Sci.*, 10, 2: 241-256.
- CURTIS, R. O., 1967. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir. *For. Sci.*, 13, 4: 365-375.

- CURTIS, R. O., 1982. A simple index of stand density for Douglas-fir. *For. Sci.*, 28, 1: 92-94.
- CURTIS, R. O., CLENDENEN, G. W. e DEMARS, D. J., 1981. A new stand simulator for coast Douglas-fir: DFSIM user's guide. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep., PNW-128.
- CURTIS, R. O., HERMAN, F. R. e DeMARS, D. J., 1974. Height growth and site index for Douglas-fir in high-elevation forests of the Oregon-Washington cascades. *For. Sci.*, 20, 4: 307-316.
- DAGNELIE, P., PALM, R., RONDEUX, J. e THILL, A., 1988. Tables de production relatives a l'épicea commun (*Picea abies* Karst.). Les Presses Agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgique, 122 p.
- DANIELS, R. F. e BURKHART, H. E., 1975. Simulation of individual tree growth and stand development in managed loblolly pine plantations. Division of Forest and Wildlife Research, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg. Publ. FWS-5-75. Cit. Huang e Titus (1995).
- DANIELS, R. F., 1976. Simple competition indices and their correlation with annual loblolly pine tree growth. *For. Sci.*, 22: 454-456.
- DANIELS, R. F., BURKHART, H. E. e CLASON, T. R., 1986. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. *Can. J. For. Res.*, 16: 1230-1237.
- DAVIS, L. S. e JOHNSON, K. N., 1987. Forest management. Third Edition, McGraw-Hill, Inc., New York, 790 p.
- DEMAERSCHALK, J. P., 1972. Converting volume equations to compatible taper equations. *For. Sci.*, 18: 241-245.
- DEMAERSCHALK, J. P., 1973. Integrated systems for the estimation of tree taper and volume. *Can. J. For. Res.*, 3: 90-94.
- DEUSEN, P. C. V., SULLIVAN, A. D. e MATNEY, T. G., 1981. A prediction system for cubic foot volume of loblolly pine applicable through much of its range. *South. J. Appl. For.*, 5: 186-189.
- DEVAN, J. S. e BURKHART, H. E., 1982. Polymorphic site index equations for Loblolly pine based on a segmented polynomial differential model. *For. Sci.*, 28, 3: 544-555.

- DGF, 1998. Plano de desenvolvimento sustentável da floresta Portuguesa (PDSFP). DGF, Lisboa.
- DGF, 2001. Inventário Florestal Nacional, 3ª Revisão, 1995-1998, Relatório final. Direcção de Serviços de Planeamento e Estatística, DGF, Lisboa.
- DOLPH, K. L., 1989. Height-diameter equations for young-growth red fir in California and southern Oregon. Research Note PSW-408, USDA For. Serv., Pac. South. For. and Range Exp. Stat., Berkeley, C A, 4 p.
- DRAPER, N. e SMITH, H., 1981. Applied regression analysis. Second Ed., John Wiley & Sons, USA, 709 p.
- DSPE e DSVPF, 2002. Programa estratégico de folhosas produtoras de madeira nobre (versão para discussão). DGF, Lisboa.
- DVPF/DRATM, 2002. Base de dados provisória dos projectos florestais com recurso à aplicação das Medidas Florestais na Agricultura (Reg. CEE 2080/92) e Programa de Desenvolvimento Florestal (PAMAF-Medida 3.1), na área de influência da DRATM. DGF, Divisão de Valorização do Património Florestal, Vila Real (não publicado).
- DYER, M. E. e BAILEY, R. L., 1987. A test of six methods for estimating true heights from stem analysis data. For. Sci., 33, 1: 3-13.
- EK, A. R. e MONSERUD, R. A., 1974. *FOREST*: a computer model for simulating the growth and reproduction of mixed species forest stands. School of Natural Resources, University of Wisconsin, Madison. Publ. R2635.
- ELFVING, B. e KIVISTE, A., 1997. Construction of site index equations for *Pinus sylvestris* L. using permanent plot data in Sweden. For. Ecol. Manage., 98: 125-134.
- EVERARD, J. e CHRISTIE, J. M., 1995. Sweet chestnut: silviculture, timber quality and yield in the Forest of Dean. Forestry, 68, 2: 133-144.
- FABBIO, G., FRATTEGANI, M. e MANETTI, M. C., 1994. Height estimation in stem analysis using second differences. For. Sci., 40, 2: 329-340.
- FABIÃO, A. M. D., 1986. Contribuição para o estudo da dinâmica da biomassa e da produtividade primária líquida em eucaliptais. Região litoral do centro de Portugal. Tese de doutoramento, UTL-ISA, Lisboa, 161 p.

- FANG, J., CHEN, A., PENG, C., ZHAO, S. e CI, L., 2001. Changes in forest biomass carbon storage in china between 1949 and 1998. *Science*, 292: 2320-2322.
- FANG, Z. e BAILEY, R. L., 1998. Height-diameter models for tropical forests on Hainan Island in southern China. *For. Ecol. Manage.*, 110: 315-327.
- FANG, Z. e BAILEY, R. L., 1999. Compatible volume and taper models with coefficients for tropical species on Hainan Island in Southern China. *For. Sci.*, 45, 1: 85-100.
- FANG, Z., BORDERS, B. E. e BAILEY, R. L., 2000. Compatible volume-taper models for loblolly and slash pine based on a system with segmented-stem form factors. *For. Sci.* 46, 1: 1-12.
- FLEWELLING, J. W. e RAYNES, L. M., 1993. Variable-shape stem-profile predictions for western hemlock. Part I. Predictions from DBH and total height. *Can. J. For. Res.*, 23:520-536.
- FONWEBAN, J. N. e HOULLIER, F., 1997. Tarifs de cubage et fonctions de défilement pour *Eucalyptus saligna* au Cameroun. *Ann. Sci. For.* 54: 513-528.
- FORTUNA, R. M., 1969. Tabela de volumes para o castanheiro bravo na Administração Florestal de Manteigas. Secretaria de Estado da Agricultura, Direcção Geral dos Serviços Florestais e Aquícolas. Jornadas Florestais, Manteigas.
- FURNIVAL, G. M., GREGOIRE, T. M. e VALENTINE, H. T., 1990. An analysis of three methods for fitting site-index curves. *For. Sci.*, 36, 2: 464-469.
- GALLANT, A. R., 1987. *Nonlinear statistical models*. John Wiley & Sons, New York.
- GALLEGO, H. A., RICO M., REGINA, I. S., 1994. Biomass equations and nutrient content for a *Castanea sativa* Mill. forest. *In: Proceedings of the International Congress on Chestnut, Spoleto, Italy*.
- GARCIA, B., 2003. Contributo para a definição de índices de qualidade de estação de *Castanea sativa* no Nordeste de Portugal. Relatório de fim de curso, I. Superior de Montes, E.T.S.I.I.A.A. (Universidad de Valladolid), IPB/ESAB, Bragança, 117 p.

- GERTNER, G. Z., 1985. Efficient nonlinear growth model estimation: its relationship to measurement interval. *For. Sci.*, 31, 4: 821-826.
- GOELZ, J. C. G. e BURK, T. E., 1992. Development of a well-behaved site index equation: jack pine in north central Ontario. *Can. J. For. Res.*, 22: 776-784.
- GOELZ, J. C. G. e BURK, T. E., 1996. Measurement error causes bias in site index equations. *Can. J. For. Res.*, 26: 1585-1593.
- GOELZ, J. C. G. e BURK, T. E., 1998. Long-term trends in height growth of jack pine in north central Ontario. *For. Sci.*, 44, 1: 158-164.
- GOULDING, C. J. e MURRAY, J. C., 1976. Polynomial taper equations that are compatible with tree volume equations. *N. Z. J. For. Sci.*, 5: 313-322.
- GREGOIRE, T. G. e DYER, M. E., 1989. Model fitting under patterned heterogeneity of variance. *For. Sci.*, 35: 105-125.
- GROVER, G. R. e HOOL, J. N., 1979. A basal area predictor of loblolly pine plantation mortality. *For. Sci.*, 25: 275-282.
- HAMILTON, D. A., 1990. Extending the range of applicability of an individual tree mortality model. *Can. J. For. Res.*, 20: 1212-1218.
- HAMILTON, G. J. e CHRISTIE, J. M., 1971. Forest management tables (metric). Forestry Commission Booklet 34, London, HMSO, 201 p.
- HARRISON, W. C., 1984. Growth models for Appalachian mixed hardwoods after thinning. M. S. Thesis. Va. Polytechnic Inst. And State Univ. School of Forestry and Wildlife Resources, Blacksburg, Virginia. Cit. Tomé (1988).
- HARRISON, W., BURK, T. e BECK, D., 1986. Individual tree basal area increment and total height equations for Appalachian mixed hardwoods after thinning. *South. J. Appl. For.*, 10: 99-104.
- HART, P. B. S., CLINTON, P. W., ALLEN, R. B., NORDMEYER, A. H. e EVANS, G., 2003. Biomass and macro-nutrients (above and below ground) in a New Zealand beech (*Nothofagus*) forest ecosystem: implications for carbon storage and sustainable forest management. *For. Ecol. Manage.*, 174: 281-294.

- HASENAUER, H., MONSERUD, R. A. e GREGOIRE, T. G., 1998. Using simultaneous regression techniques with individual-tree growth models. *For. Sci.*, 44, 1: 87-95.
- HENRIKSEN, H. A., 1950. Height-diameter curve for logarithmic diameter. *Dansk. Skovforen. Tidsskr.*, 35: 193-202.
- HESTER, A. S., HANN, D. W. e LARSEN, D. R., 1989. *ORGANON*: Southwest Oregon growth and yield model user manual. For. Res. Lab., College of Forestry, Oregon State Univ., Corvallis.
- HIX, D. M. e LORIMER, C. G., 1990. Growth-Competition Relationships in young hardwood stands on two contrasting sites in South-western Wisconsin. *For. Sci.*, 36, 4: 1032-1049.
- HÖKKÄ, H. e GROOT, A., 1999. An individual-tree basal area growth model for black spruce in second-growth peatland stands. *Can. J. For. Res.*, 29: 621-629.
- HONER, T. G., 1967. A new total cubic-foot volume function. *For. Chron.*, 41: 476-493.
- HONER, T. G., 1967. Standard volume tables and merchantable conversion factors for the commercial tree species of Central and Eastern Canada. Ottawa, Ontario, For. Manage. Res. and Serv. Inst. Inform. Rep., FMR-X-5, 21 p. + Apêndices.
- HOUGHTON, R. A., LAWRENCE, K. T., HACKLER, J. L. e BROWN, S., 2001. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. *Glob. Chang. Biol.*, 7: 731-746.
- HUANG, S. e TITUS, S. J., 1995. An age-independent individual tree height prediction model for boreal spruce-aspen stands in Alberta. *Can. J. For. Res.*, 24: 1295-1301.
- HUANG, S., 1997. Development of compatible height and site index models for young and mature stands within an ecosystem-based management framework. *In* "Empirical and process-based models for forest tree and stand growth simulation", Ed. Ana Amaro e Margarida Tomé, Edições Salamandra, Oeiras, Portugal: 61-98.
- HUANG, S., PRICE, D. e TITUS, S. J., 2000. Development of ecoregion-based height-diameter models for white spruce in boreal forests. *For. Ecol. Manage.*, 129: 129-141.

- HUANG, S., TITUS, S. J. e WIENS, D. P., 1992. Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species. *Can. J. For. Res.*, 22: 1297-1304.
- HUEBSCHMANN, M. M., LYNCH, T. B. e MURPHY, P. A., 2000. An individual-tree growth and yield prediction system for uneven-aged shortleaf pine stands. *South. J. Appl. For.*, 24, 2: 112-120.
- HUSCH, B., MILLER, C. I. e BEERS, T.W., 1982. *Forest Mensuration*. Third edition, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 402 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA E GEOFÍSICA, 1991. *O Clima de Portugal*. Fascículo XLIX, Vol. 3, 3ª Região, 70 p.
- JOHANSSON, T., 1999. Site index curves for common alder and grey alder growing on different types of forest soil in Sweden. *Scand. J. For. Res.*, 14: 441-453.
- JUDGE, G. G., HILL, R. C., GRIFFITHS, W. E., *et al.*, 1988. *Introduction to the theory and practice of econometrics*. 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons, New York.
- KER, M. F. e BOWLING, C., 1991 – Polymorphic site index equations for four New Brunswick softwood species. *Can. J. For. Res.*, 21: 728-732.
- KORF, V., 1973. Vymezení vysokového rustového oboru pro smrkové rustové tabulky. *Lesnictví-Forestry*, 19:855-868.
- KORSUN, F., 1935. Život nomálního porostu ve vzorcích (das leben des normalen bestandes in formeln). *Lesnická Práce*: 289-300.
- KORZUKHIN, M. D., TER-MIKAELIAN, M. T. e WAGNER, R. G., 1996. Process versus empirical models: which approach for forest ecosystem management? *Can. J. For. Res.*, 26: 879-887.
- KOZAK, A. e KOZAK, R., 2003. Does cross validation provide additional information in the evaluation of regression models? *Can. J. For. Res.*, 33: 976-987.
- KOZAK, A., 1988. A variable-exponent taper equation. *Can. J. For. Res.*, 18: 1363-1368.
- KOZAK, A., MUNRO, D. D. e SMITH, J. H. C., 1969. Taper functions and their application in forest inventory. *For. Chron.*, 45: 278-283.

- LAPPI, J. e BAILEY, R. L., 1988. A height prediction model with random stand and tree parameters: an alternative to traditional site index methods. *For. Sci.*, 34, 4: 907-927.
- LARSEN, D. R. e HANN, D. W., 1987. Height-diameter equations for seventeen tree species in southwest Oregon. *Oreg. State Univ. For. Res., Lab. Res. Bull.* 49.
- LARSON, B. C., 1986. Development and growth of even-aged stands of Douglas-fir and grand fir. *Can. J. For. Res.*, 16: 367-372.
- LENHART, J., 1968. Yield of old-field loblolly pine plantations in the Georgia piedmont. Ph. D. Thesis, University of Georgia, Georgia.
- LEONARDI, S., RAPP, M., GALLEGO, H. A., FAILLA, M. e GUARNACCIA, D., 1996 (b). Biomasse, productivité et transférís de matière organique dans une séquence altitudinale de peuplements de *Castanea sativa* Mill de l'Etna. *Ann. Sci. For.*, 53: 1031-1048.
- LEONARDI, S., REGINA, S. I., RAPP, M., GALLEGO, H. A., RICO, M., 1996 (a). Biomass, litterfall and nutrient content in *Castanea sativa* coppice stands of southern Europe. *Ann. Sci. For.*, 53: 1071-1081.
- LESSARD, V. C., MCROBERTS, R. E. e HOLDAWAY, M. R., 2001. Diameter growth models using Minnesota forest inventory and analysis data. *For. Sci.*, 47, 3: 301-310.
- LIU, J. e BURKHART, E. H., 1993. Dynamics of size-variable distribution parameters in juvenile loblolly pine (*Pinus taeda* L.) stands. *For. Ecol. Man.*, 58: 321-347.
- LLOYD, F. T. e HAFLEY, W. L., 1977. Precision and the probability of misclassification in site index estimation. *For. Sci.*, 23, 4: 493-499.
- LOETSCH, F., ZÖHRER, F. e HALLER, K. E., 1973. Forest inventory. Vol. II, BLV Verlagsgesellschaft Muchen, 469 p.
- LOGUERCIO, G. A. e DEFOSSÉ, G., 2002. Ecuaciones de biomassa aérea, factores de expansión de reducción de la lenga *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) krasser, en el SO del Chubut, Argentina. Proc. Simposio Internacional "Medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales" in IUFRO World series, 13: 115-120.

- LORIMER, C. G., 1983. Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. *For. Ecol. Manage.*, 6: 343-360.
- LUNDQVIST, L., 1994. Growth and competition in partially cut sub-alpine Norway spruce forests in northern Sweden. *For. Ecol. Manage.*, 65: 115-122.
- LYNCH, T. B., HUEHSCHMANN, M. M. e MURPHY, P. A., 1999. An individual-tree growth and yield prediction system for even-aged natural shortleaf pine forests. *South. J. Appl. For.*, 23, 4: 203-211.
- MAGNUSSEN, S. e PENNER, M., 1996. Recovering time trends in dominant height from stem analysis. *Can. J. For. Res.*, 26: 9-22.
- MAIA, M. L R. M., 1988. A silvicultura do castanheiro na região de Trás-os-Montes. Inst. Nac. Inv. Agr., Estação Florestal Nacional, Bragança, 241 p.
- MAIA, M. L. M., LUÍS, J. S. e OLIVEIRA, A. C., 1990. Crescimento e produção de povoamentos de *Castanea sativa* Miller em alto fuste: primeiros resultados. Livro de Comunicações do “II Congresso Florestal Nacional”, Porto: 360-370.
- MÁKELÁ, A., 1997. A carbon balance model of growth and self-pruning in tree based on structural relationships. *For. Sci.* 43: 7-24.
- MARQUES, C. P., 1987. Qualidade das estações Florestais. Povoamentos de pinheiro bravo do vale do Tâmega. Tese de Doutoramento, UTAD, Vila Real, 201 p.
- MARQUES, C. P., 1991. Evaluating site quality of even-aged maritime pine stands in northern Portugal using direct and indirect methods. *For. Ecol. Manage.*, 41: 193-204.
- MARTIN, A., GALLARDO, J. F. e REGINA, I. S., 1996. Dinámica de las fracciones orgánicas en la descomposición de hojas de rebollos de castanho. *Silv. Lus.*, 4, 2: 199-216.
- MARTIN, G. L. e EK, A. R., 1984. A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth. *For. Sci.*, 30, 3: 731-743.
- MARTIN, G. L., 1982. Estimation of individual tree competition from horizontal point sample data. *For. Sci.*, 28, 1: 45-48.
- MARTINS, A., AZEVEDO, S. e CARVALHO, L., 1999. Dynamics of leaf litter structural compounds in *C. sativa* and *P. pinaster* forest ecosystems during the decomposition process: interactions with soil organic

- matter and nutrient release. Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Symp. on Chestnut. Acta Hort., 494: 161-166.
- MATNEY, T. G. e SULLIVAN, A. D., 1980. Estimation of merchantable volume and height of natural grown slash pine trees. Arid Land Resources Inventories Workshop, La Paz, Mexico.
- MAW, P. T., 1912. Complete yield tables for British woods. Crosby Lockwood, London. Cit. Everard e Christie (1995).
- MAX, T. A. e BURKHART, H. E., 1976. Segmented polynomial regression applied to taper equations. For. Sci., 22: 283-289.
- McDILL, M. E. e AMATEIS, R. L., 1992. Measuring forest site quality using the parameters of a dimensionally compatible height growth function. For. Sci., 38, 2: 409-429.
- McNAB, W. H., 2002. Accuracy of eastern white pine site index models developed in the southern Appalachian mountains. Proceedings of the eleventh biennial southern silvicultural research conference. U. S. Depart. of Agric., For. Serv. Res., South. Res. Stat.: 443-447.
- MENG, F. R., MENG, C. H., TANG, S. e ARP, P. A., 1997. A new height growth model for dominant and codominant trees. For. Sci., 43, 3: 348-354.
- MEYER, H. A., 1940. A mathematical expression for height curves. J. For., 38: 415-420.
- MICHAILOFF, I., 1943. Zahlenmässiges verfahren für die ausführung der bestandeshöhenkurven forstw. Clb. U. Thar. Forstl. Jahrb., 6: 273-279.
- MONSERUD, R. A., 1984. Height growth and site index curves for inland Douglas-fir based on stem analysis and forest habitat type. For. Sci., 30, 4: 943-965.
- MONSERUD, R. A., 2003. Evaluating forest models in a sustainable forest management context. FBMIS, 1: 35-47. (<http://www.fbmis.info>).
- MONTEIRO, M. L. e PATRÍCIO, M. S., 1997. O castanheiro modelos de gestão. Rev. Flor., IX, 4: 51-56.
- MONTGOMERY, D. C. e PECK, E. A., 1982. Introduction to linear regression analysis. Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, New York, 504 p.

- MUNRO, D., 1974. Forest growth models - prognosis. *In*: J. Fries (edit.), Growth models for tree and stand simulation, Actas Conf. IUFRO, Estocolmo, Suécia, Royal College of Forestry, Res. Notes 30: 7-21.
- MYERS, C. e BELCHER, D. M., 1981. Estimating total tree height for upland oaks and hickories in southern Illinois. Res. Note NC-272, USDA – For. Serv., North Central For. Exp. Stat., St. Paul, MN, 3 p.
- MYERS, R. H., 1986. Classical and modern regression with applications. Ed. Duxbury Press, Boston, 359 p.
- NANANG, D. M. e NUNIFU, T. K., 1999. Selecting a functional form for anamorphic site index curve estimation. *For. Ecol. Manage.*, 118: 211-221.
- NATIVIDADE, J. V., 1990. Subericultura. Ministério da Agricultura Pesca e Alimentação, 2ª edição, DGF, Lisboa, 387 p.
- NELSON, R. F., KIMES, D. S., SALES, W. A. e ROUTHIER, M., 2000. Secondary forest age and tropical forest biomass estimation using thematic mapper imagery. *Bioscience*, 50: 419-431.
- NETER, J., WASSERMAN, W. e KUTNER, M., 1990. Applied linear statistical models. Third ed., IRWIN, Homewood, IL.
- NEWBERRY, J. D., 1991. A note on Carmean's estimate of height from stem analysis data. *For. Sci.*, 37, 2: 368-369.
- NEWHAM, R. M., 1992. Variable-form taper functions for four Alberta tree species. *Can. J. For. Res.*, 22: 210-223.
- NIGH, G. D. e SIT, V., 1996. Validation of forest height-age models. *Can. J. For. Res.*, 26: 810-818.
- NIGH, G. D., 2001. Species-independent height-age models for British Columbia. *For. Sci.*, 47, 2: 150-157.
- NIGH, G. D., 2001. Western redceder site index models for the interior of British Columbia. Ministry of Forests, Research Program, Research Report 18, Published by Forestry Division Services Branch, Victoria, 24 p.
- NUNES, L. F. S. T., 2001. Estudo biométrico com vista à elaboração de tabelas de volume para o castanheiro. Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 196 p.
- OGAYA, N., 1968. Kubierungsformeln und Bestandesmassenformeln. Thesis, Univ. Freiburg I. Br., 85 p. Cit. Loetsch *et al.* (1973).

- OLIVEIRA, A. M. C., 1980. Índices de concorrência na elaboração de modelos de produção florestal. Separata do Vol. XXXIX dos Anais do ISA, Lisboa: 208-251.
- OLIVEIRA, A. M. C., 1982. Curvas de classe de qualidade provisórias de povoamentos de Pinheiro bravo da Serra da Estrela. Separata do Vol. XL dos Anais do ISA, Lisboa: 239-255.
- OLIVEIRA, A. M. C., 1985. Tabela de produção geral para o pinheiro bravo das regiões montanas e submontanas. Centro de Estudos Florestais (INIC), DGF, Lisboa, 50 p.
- ORMEROD, D. W., 1973. A simple bole model. *For. Chron.* 49: 136-138.
- PALIK, B. J. e PREGITZER, K. S., 1995. Variability in early height growth rate of forest trees: implications for retrospective studies of stand dynamics. *Can. J. For. Res.*, 25: 767-776.
- PARDÉ, J., BOUCHON, J., 1988. Dendrométrie. ENGREF, 2<sup>a</sup> édition, Nancy, 328 p.
- PARRESOL, B. R. e VISSAGE, J. S., 1998. White pine site index for the southern forest survey. Southern Research Station, U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Research Paper SRS-10, 8 p.
- PARRESOL, B. R., 1992. Baldcypress height-diameter equations and their prediction confidence intervals. *Can. J. For. Res.*, 22: 1429-1434.
- PARRESOL, B. R., 1999. Assessing tree and Stand Biomass: a review with examples and critical comparations. *For. Sci.*, 45, 4: 573-593.
- PARRESOL, B. R., 2001. Additivity of nonlinear biomass equations. *Can. J. For. Res.*, 31: 865-878.
- PARRESOL, B. R., 2002. Biomass. *Encyclopaedia of Environmetrics*. Abdel H. El-Shaarawi and Walter W. Piegorsch (Eds.). John Wiley & Sons, Chichester, 1: 196-198.
- PARRESOL, B. R., HOTVEDT, J. E. e CAO, Q. V., 1987. A volume and taper prediction system for bald cypress. *Can. J. For. Res.*, 17: 250-259.
- PÁSCOA, M. F. M., 1987b. Ensaio para a modelação da produção lenhosa em castiçais. Comunicações do “Encontro sobre sotos e castiçais (conservação, silvicultura e utilizações)”. SPCF, Castelo de Vide: 59-65.

- PÁSCOA, M. F. M., 1987a. Estrutura, crescimento e produção em povoamentos de pinheiro bravo. Um modelo de simulação. Dissertação de Doutoramento, ISA, Lisboa, 241 p.
- PATRÍCIO, M. S F., 1996. Análise do crescimento da fase juvenil de um ensaio de densidade de varas numa talhadia de castanheiro. Tese de Mestrado, UTL-ISA, Lisboa, 172 p.
- PAYANDEH, B. e WANG, Y., 1994. Relative accuracy of a new base-age invariant site index model. *For. Sci.*, 40, 2: 341-348.
- PEARL, R., e REED, L. J., 1920. On the rate of growth of the population of the United States since 1790 and its mathematical representation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 6: 275-288.
- PEREZ, D. N., BURKHART, H. E. e STIFF, C. T., 1990. A variable-form taper function for *Pinus oocarpa* schiede in central Honduras. *For. Sci.* 36: 186-191.
- PETTERSON, H., 1955. Barrskogens volymproduktion. *Meddelanden fran Statens Skogsforskningsinstitut*, tome 45, 391 p.
- PICARD, R. R. e COOK, R. D., 1984. Cross-validation of regression models. *J. Am. Stat. Assoc.* 79: 575-583.
- PIRES, A. L., RIBEIRO, E., CORREIA, I., BARROSO, N., CLAUDINO, F. e PORTELA, E., 1999. Effect of ink disease on chestnut litterfall production and on nutrient budgets over a 3-year period. *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Symp. on Chestnut. Acta Hort.*, 494:149-154.
- PRODAN, M., 1951. Messung der waldbestände. J. D. Sauerländer's Verlag Frankfurt-am-Main, 259 p.
- PRODAN, M., 1965. Holzmesslehre. I. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt-am-Main, 644 p.
- RANGER, J., FELIX, C., BOUCHON, J., NYS, C. e RAVART, M., 1990. Dynamique d'incorporation du carbone et des éléments nutritifs dans un taillis simple de châtaigner (*Castanea sativa*). *Ann. Sci. For.*, 47: 413-433.
- RATKOWSKY, D. A. e REEDY, T. J., 1986. Choosing near-linear parameters in the four-parameter logistic model for radioligand and related assays. *Biometrics*, 42: 575-582.

- RATKOWSKY, D. A., 1990. Handbook of nonlinear regression. Marcel Dekker, Inc., New York.
- REED, D. D. e GREEN, E. J., 1984. Compatible stem taper and volume ratio equations. For. Sci., 30, 4: 977-990.
- REED, D. D., JONES, E. A., TOMÉ, M. E., ARAÚJO, M. C., 2003. Models of potential height and diameter for *Eucalyptus globulus* in Portugal. For. Ecol. Manage., 172: 191-198.
- REED, D., MROZ, G. D., LIECHTY, H. O., JONES, E. A., CATTELINO, P. J., BALSTER, N. J. e ZHANG, Y., 1995. Above and below-ground biomass of precompetitive red pine in Northern Michigan. Can. J. For. Res., 25: 1064-1069.
- REGINA, I. S., 2000. Organic matter distribution and nutrient fluxes within a sweet chestnut (*Castanea sativa* Mill.) stand of the Sierra de Gata, Spain. Ann. For. Sci., 57: 691-700.
- REGINA, I. S., LEONARDI, S. e RAPP, M., 2001. Foliar nutrient dynamics and nutrient-use efficiency in *Castanea sativa* coppice stands of southern Europe. Forestry, 74, 1:1-10.
- REYNOLDS, Jr., BURKHART, H. E. e DANIELS, R. F., 1981. Procedures for statistical validation of stochastic simulation models. For. Sci., 27, 2: 349-364.
- RICHARDS, F. L., 1959. A flexible growth function for empirical use. J. Exp. Bot., 10: 290-300.
- RICKER, W. E., 1973. Linear regressions in fishery research. J. Fish. Res. Board Can., 30: 409-434.
- RICKER, W. E., 1984. Computation and uses of central trend lines. Can. J. Zool., 62: 1897-1905.
- RIGNOT, E., SALES, W.A., SKOLE, D. L., 1997. Mapping deforestation and secondary growth in Rondônia, Brazil, using imaging radar and thematic mapper data. Rem. Sens. Env., 59: 167-179.
- RITSON, P., SOCHACKI, S., 2003. Measurement and prediction of biomass and carbon content of *Pinus pinaster* trees in farm forestry plantations, south-western Australia. For. Ecol. Manage., 175: 103-117.
- RONDEUX, J. e THIBAUT, A., 1996. Tables de production relatives au douglas. Les Presses Agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgique, 152 p.

- RONDEUX, J., 1993. La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Les Presses Agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgique, 521 p.
- ROSE, Jr. C. E., LYNCH, T. B., 2001. Estimating parameters for tree basal area growth with a system of equations and seemingly unrelated regressions. *For. Ecol. Manage.*, 148: 51-61.
- RUSTAGI, K.P. e LOVELESS, R.S. Jr., 1991. Compatible variable-form volume and stem-profile equations for Douglas-fir. *Can. J. For. Res.*, 21: 145-151.
- SATOO, T. e MADGWICK, H. A. I., 1982. Forest biomass. Madgwick H. A. I. (Eds.). Martinus Nijhoff /Dr W. Junk Publishers, The Hague, London, 152 p.
- SCHLEGEL, B., 2002. Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. Proceedings Simposio internacional “Medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales” in IUFRO World Series Vol. 13: 233-240.
- SCHNUTE, J., 1981. A versatile growth model with statistically stable parameters. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 38: 1128-1140.
- SCHROEDER, P., BROWN, J. M. O., BIRDSEY, R e CIESZEWSKI, C., 1997. Biomass estimation for temperate broadleaf forest of the United States using inventory data. *For. Sci.*, 43, 3: 424-434.
- SCHUMACHER, F. X. e HALL, F., 1933. Logarithmic expression of timber-tree volume. *J. Ag. Res.*, 47: 719-734.
- SCHUMACHER, F. X., 1939. A new growth curve and its application to timber – yield studies. *J. For.*, 37: 819-820.
- SCHWALM, C. e EK, A. R., 2001. Climate change and site: relevant mechanisms and modeling techniques. *For. Ecol. Manage.*, 150: 241-257.
- SEBER, G. A. F. e WILD, C. J., 1989. Nonlinear regression. Wiley, New York, 768p.
- SHAO, J., 1993. Linear model selection by cross-validation. *J. Am. Stat. Assoc.* 88: 486-498.
- SHARMA, M. e BURKHART, H., 2003. Selecting a level of conditioning for the segmented polynomial taper equation. *For. Sci.*, 49, 2: 324-330.
- SHARMA, M. e ODERWALD, R. G., 2001. Dimensionally compatible volume and taper equations. *Can. J. For. Res.*, 31: 797-803.

- SHARMA, M., AMATEIS, R. L. e BURKHART, H. E., 2002. Top height definition and its effect on site index determination in thinned and unthinned loblolly pine plantations. *For. Ecol. Manage.*, 168: 163-175.
- SHIFLEY, S. R., 1987. A generalized system of models forecasting Central States growth. USDA For. Serv., Res. Pap. NC-279, 10 p.
- SIBBESEN, E., 1981. Some new equations to describe phosphate sorption by soils. *J. Soil Sci.*, 32: 67-74.
- SMITH, J. H. G., KER, J. W. e CSIZMAZIA, J., 1961. Economics of reforestation of Douglas-fir, western hemlock, and western red cedar in the Vancouver Forest District. Univ. of British Columbia Forestry Bull.- 3. Cit. Husch *et al.* (1982).
- SOARES, P. e TOMÉ, M., 1997. A distance dependent diameter growth model for first rotation eucalyptus plantations in Portugal. In “Empirical and process- based models for forest tree and stand growth simulation”, Ed. Ana Amaro e Margarida Tomé, Edições Salamandra, Oeiras, Portugal: 255-270.
- SOARES, P. e TOMÉ, M., 1999. Distance-dependent competition measures for eucalyptus plantations in Portugal. *Ann. For. Sci.*, 56: 307-319.
- SOARES, P. e TOMÉ, M., 2002 – Height-diameter equation for first rotation eucalypt plantations in Portugal. *For. Ecol. Manage.*, 166: 99-109.
- SPURR, S. H., 1952. Forest inventory. Ronald Press, New York, 476p.
- SPURR, S. H., 1962. A measure of point density. *For. Sci.*, 8: 85-96.
- STAGE, A. R., 1973. Prognosis model for stand development. USDA For. Serv. Res. Pap. INTR-137.
- STANSFIELD, W. F., McTAGUE, J. P. e LACAPA, R., 1991. Dominant-height and site-index equations for ponderosa pine in east-central Arizona. *Can. J. For. Res.*, 21: 606-611.
- STOFFELS, A. E e VAN SOEST, J., 1953. The main problems in sample plots. 3 - height regression. *Ned. Bosb. Tijdschr.*, 25: 190-199.
- STONE, M., 1974. Cross-validation choice and assessment of statistical predictions. *J. R. Stat. Soc. Series B*, 36: 111-147. Cit. Kozak e Kozak (2003).
- SWINDEL, B., 1968. On the estimation of forest growth parameters in a linear model with correlated errors. Unpublished Ph D diss, NC State Univ, Raleigh, 107 p. Cit. Gertner (1985).

- TAKATA, K., 1958. Construction of universal diameter-height-curves. J. Jap. For. Soc., 40, 1: 1-6. Cit. Loetsch *et al.* (1973).
- TARP-JOHANSEN, M. J., SKOVGAARD, J. P., MADSEN, S. F., JOHANNSEN, V. K. e SKOVGAARD, I., 1997. Compatible stem taper and stem volume functions for oak (*Quercus robur* L. and *Q. petraea* (Matt.) Liebl) in Denmark. Ann. Sci. For., 54: 577-595.
- TASSISSA, G., BURKHART, H. E. e AMATEIS, R. L., 1997. Volume and taper equations for thinned and unthinned loblolly pine trees in cutover, site-prepared plantations. South. J. Appl. For., 21: 146-152.
- TECK, R. M. e HILT, D. E., 1991. Individual-tree diameter growth model for the Northeastern United States. USDA For. Serv. Res. Pap. NE-649, 10 p.
- TER-MIKAELIAN, M. T., e KORZUKHIN, M. D., 1997. Biomass equations for sixty-five North American tree species. For. Ecol. Manage. 97: 1-24.
- TESHOME, T. e PETTY, J. A., 2000. Site index equation for *Cupressus lusitanica* stands in Munessa forest, Ethiopia. For. Ecol. Manage., 126: 339-347.
- TEWARI, V. P. e KUMAR, V. S. K., 2002. Development of top height model and site index curves for *Azadirachta indica* A. juss. For. Ecol. Manage., 165: 67-73.
- THOMAS, C. E. e PARRESOL, B. R., 1991. Simple, flexible, trigonometric taper equations. Can. J. For. Res., 21: 1132-1137.
- TIARKS, A. E., MEIER, C. E., BALDWIN, V. C. e HAYWOOD, J. D., 1997. Value of tree measurements made at stage 5 years for predicting the height and diameter growth at age 25 years in loblolly pine plantations. Proceedings of the ninth biennial southern silvicultural research conference. Southern Research Station, U. S. Depart. of Agric., For. Serv., Gen. Techn. Rep. SRS-20: 537-541.
- TOMÉ, J. A. L., 1990. Estimaco do volume total, de volumes mercantis e modelaco do perfil do tronco em *Eucalyptus globulus* Labill. Tese de Mestrado, UTL-ISA, Lisboa, 66 p.
- TOMÉ, M. e BURKHART, H. E., 1989. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. For. Sci., 35, 3: 816-831.

- TOMÉ, M., 1988. Modelação do crescimento da árvore individual em povoamentos de *Eucalyptus globulus* Labill. (1ª rotação) Região Centro de Portugal. Tese de Doutoramento, UTL-ISA, Lisboa.
- TOMÉ, M., 1989. Individual tree distance dependent diameter growth models for eucalypt plantations. In: Burkhart, H. Raucher e K. Johann (edit.), Artificial Intelligence and Growth Models for Forest Management Decisions, Blacksburg, USA, School of Forestry and Wildlife Resources, VPI&SU, Pub. n° FWS-1-89: 85-99.
- TOMÉ, M., 1990a. Os índices de competição na modelação do crescimento das árvores dos povoamentos. II Congresso Florestal Nacional, SPCF, Porto: 261-272.
- TOMÉ, M., RIBEIRO, F. e FAIAS, S., 2001. Equações para estimação de volumes totais e mercantis da árvore para *Eucalyptus globulus* L. em Portugal. Relatórios Técnico-científicos do GIMREF, nº4, DEF, UTL-ISA, Lisboa, 36 p. + anexos.
- TRASOBARES, A., TOMÉ, M. e MIINA, J., 2004. Growth and yield model for *Pinus halepensis* Mill. in Catalonia, North-East Spain. For. Ecol. Manage., 203 (1-3): 49-62.
- TROREY, L. G., 1932. a Mathematical method for the construction of diameter-height curves based on site. For. Chron., 8: 121-132.
- VALENTINE, H. T. e GREGOIRE, T. G., 2001. A switching model of bole taper. Can. J. For. Res., 31: 1400-1409.
- VANCLAY, J. K., 1992. Assessing site productivity in tropical moist forests: a review. For. Ecol. Manage., 54: 257-287.
- VANCLAY, J. K., 1994. Modelling forest growth and yield. Applications to mixed tropical forests. Thirst edition, CABI Publishing, New York, 311 p.
- VANCLAY, J. K., 1995. Growth Models for tropical forests: A synthesis of models and methods. For. Sci., 41, 1: 7-42.
- WAGNER, R. G. e TER-MIKAELIAN, M. T., 1999. Comparison of biomass component equations for four species of northern coniferous tree seedlings. Ann. For. Sci., 56: 193-199.
- WALSH, T. A., 1986. Diameter/ basal area increment equations for loblolly pine trees in cutover, site-prepared plantations. M. S. thesis, VPI & SU, Blacksburg, VA. 74 p. Cit. Tomé e Burkhart (1989).

- WANG, C. e HANN, D. W., 1988. Height-diameter equations for sixteen tree species in the central western Willamette Valley of Oregon. *Oreg. State Univ. For. Res., Lab. Res. Pap.* 51.
- WANG, G. G. e KLINKA, K., 1997. White spruce foliar nutrient concentrations in relation to tree growth and soil nutrient amounts. *For. Ecol. Manage.*, 98: 89-99.
- WANG, G. G., 1998. Is height of dominant trees at a reference diameter an adequate measure of site quality? *For. Ecol. Manage.*, 112: 49-54.
- WANG, Y. e PAYANDEH, B., 1993. A numerical method for the solution of a base-age-specific site index model. *Can. J. For. Res.*, 23: 2487-2489.
- WARING, R. H., WAY, J., HUNT, E. R., MORRISSEY, L., RANSON, K. J., WEISHAMPEL, J. F., OREN, R., FRANKLIN, S. E., 1995. Imaging radar for ecosystem studies. *Bioscience*, 45, 10: 715-723.
- WATTS, S. B., 1983. *Forestry handbook for British Columbia*. 4<sup>th</sup> ed. Forestry Undergraduate Society, Vancouver, B. C.
- WEST, P. W., 1980. Use of diameter increment and basal area increment in tree growth studies. *Can. J. For. Res.*, 10: 71-77.
- WHITTAKER, R. H., BORMANN, F. H., LIKENS, G. E., SCCAMA, T. G., 1974. The Hubbard Brook ecosystem: Forest biomass and production. *Ecol. Monogr.*, 44: 233-252. Cit. Wagner e Ter-Mikaelian (1999).
- WILLIAMS, M. S. e GREGOIRE, T. G., 1993. Estimating weights when fitting linear regression models for tree volume. *Can. J. For. Res.*, 23: 1725-1731.
- WILLIAMS, M. S. e SCHREUDER, H. T., 2000. Guidelines for choosing volume equations in the presence of measurement error in height. *Can. J. For. Res.*, 30: 306-310.
- WIMBERLY, M. C. e BARE, B. B., 1996. Distance-dependent and distance-independent models of Douglas-fir and western hemlock basal area growth following silvicultural treatment. *For. Ecol. Manage.* 89: 1-11.
- WINSOR, C. P., 1932. The Gompertz curve as a growth curve. *Proc. Natl. Acad. Sci USA*, 18: 1-7.
- WYKOFF, W. R., 1990. A basal area increment model for individual conifers in the Northern Rocky Mountains. *For. Sci.*, 36, 4: 1077-1104.

- WYKOFF, W. R., CROOKSTON, N. L., STAGE, A. R., 1982. User's guide to the stand prognosis model. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-133.
- YANG, R. C., KOZAK, A. e SMITH, J. H. G., 1978. The potential of Weibull-type functions as a flexible growth curves. *Can. J. For. Res.*, 8: 424-431.
- ZEIDE, B. e VANDERSCHAAF, C., 2002. The effect of density on the height-diameter relationship. Proceedings of the eleventh biennial southern silvicultural research conference. Gen. Tech. Rep., SRS-48. Asheville, NC: U.S. Dep. of Agric., For. Serv., South. Res. Stat.: 463-466.
- ZEIDE, B., 1989. Accuracy of equations describing diameter growth. *Can. J. For. Res.*, 19: 1283-1286.
- ZEIDE, B., 1990. Structure of growth equations. *In* Forest simulation systems, Wensel, L. C., and G. S. Biging (eds.). Proc. IUFRO Conf. Univ. of Calif. Div. of Agric. and Natur. Resour., Bull. 1927: 349-354.

## ANEXOS

## ANEXO I

(Descrição morfológica, física e química de um perfil tipo para os diferentes locais onde se procedeu à recolha de dados)

## Caracterização morfológica dos Perfis:

**Local:** Padrela

**Perfil 1**

**Tipo de solo:** Regossolo dístico

Declive: (encosta) 52%

**(8-0 cm)** – Folhada em decomposição

**Ah1 (0-15 cm)** – Pardo escuro 10YR 3/2 (s), Negro 10YR 2/1 (h); Franco, com pouco saibro e algum cascalho de quartzo e xisto, achatado e subanguloso; agregação granulosa fina a muito fina, moderada a forte; compacidade pequena; muitos poros finos e médios; brando, friável, pouco adesivo, pouco plástico; muitas raízes finas e médias e algumas grossas; seco; transição nítida;

**Ah2 (15-45 cm)** – Pardo 10YR 4/4 (s), Pardo escuro 10YR 3/2 (h); Franco-arenoso, algum saibro e cascalho de quartzo e xisto, muitas pedras e poucos blocos de rocha, achatadas e angulosas; sem agregação a granulosa fina a média, moderada; bastantes poros finos, médios e grosseiros; compacidade pequena a grande; solto a brando, solto a friável, não adesivo e não plástico a pouco plástico; algumas raízes finas a médias e poucas grossas; seco; transição nítida;

**C1 (45-100 cm)** – Pardo amarelado 10YR 6/6 (s), Pardo escuro 10YR 4/4 (h); Franco-arenoso, bastantes pedras e cascalho, angulosas e achatadas; sem agregação, anisforme subangulosa, fino, fraco; moderadamente poroso; compacidade pequena a média; solto a brando, solto a friável, não adesivo a pouco adesivo, não plástico a pouco plástico; algumas raízes finas e poucas médias; seco.

Prof. (cm)	pH		C	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca	Mg	K	Na	Acidez	Al	CTCe	GSB %
	H <sub>2</sub> O	KCL	gkg <sup>-1</sup>	gkg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>		cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup>							
0-15	4,8	4,1	70,7	4,0	19,5	169,0	2,01	0,67	0,39	0,07	1,74	1,44	4,90	61,6
15-45	5,1	4,1	16,3	2,0	7,0	144,0	0,29	0,19	0,22	0,06	1,81	1,55	2,58	29,7
45-100	5,0	4,0	3,8	-	7,0	64,0	0,29	0,26	0,21	0,06	2,87	2,51	3,68	22,1

Prof. (cm)	B extr mg kg <sup>-1</sup>	densidade aparente	EG	AG	AF	L	A	Classificação
			-----g kg <sup>-1</sup> -----					
4-15	1,93	0,56	343,9	219,5	438,0	260,5	81,5	Franco
15-45	0,72	0,57	602,6	221,0	479,0	187,0	113,0	Franco-arenoso
45-100	0,70	-	558,4	314,0	460,0	153,0	74,0	Franco-arenoso

B extr: Boro extraível; EG: elementos grosseiros; AG: areia grossa; AF: areia fina; L: limo; A: argila

**Local: Bornes**

**Perfil 1**

**Tipo de solo:** Regossolo dístrico

Declive: Meia encosta da linha de água em V

Exposição N.NE

**(1,5-0 cm)** - Folhada em decomposição

**Ap (0-35 cm)** - Pardo amarelado 10YR 5/4 (s), Pardo escuro 10YR 4/4 (h); Franco, com algumas pedras, pouco saibro e bastante cascalho de xisto, subanguloso; granuloso fino a médio forte; compacidade média; bastante poroso; brando, friável, pouco adesivo, pouco plástico; muitas raízes finas, algumas médias e raras grossas; pouco fresco; transição nítida ondulada;

**C1 (35-60 cm)** – Pardo forte 7,5YR 4/6 (s), Pardo escuro 7,5YR 4/4 (h); Franco-limoso, muito cascalho e algumas pedras achatadas subangulosas de xisto e quartzo; granuloso fino médio e moderado principalmente junto às raízes; bastantes poroso; consistência branda, friável, não adesivo, pouco plástico; bastantes raízes finas, algumas médias e poucas grossas; pouco fresco; transição ondulada;

**C2 (60-100 cm)** – Pardo amarelo avermelhado 7,5YR 6/6 (s), Pardo forte 7,5YR 5/8 (h); Franco com muito saibro, muito cascalho, algumas pedras, de xisto achatado subanguloso; sem agregação a granuloso, fino, fraco; poroso; solto a brando, solto a friável, pouco pegajoso, pouco plástico; algumas raízes finas; fresco.

Prof. (cm)	pH		C g kg <sup>-1</sup>	N g kg <sup>-1</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg kg <sup>-1</sup>	K <sub>2</sub> O mg kg <sup>-1</sup>	Ca	Mg	K	Na	Acidez	Al	CTCe	GSB %
	H <sub>2</sub> O	KCL												
0-35	5,5	4,1	35,0	1,8	2,0	70,0	1,09	0,91	0,22	0,08	0,56	0,40	2,85	80,2
35-60	5,3	4,0	27,0	1,3	1,0	36,0	0,53	0,29	0,10	0,08	0,71	0,62	1,71	58,7
60-100	5,4	3,9	26,0	0,4	1,0	32,0	0,78	0,56	0,05	0,04	0,78	0,66	2,21	65,0

Prof. (cm)	B extr mg kg <sup>-1</sup>	densidade aparente	EG	AG	AF	L	A	Classificação
			-----g kg <sup>-1</sup> -----					
0-35	0,44	0,81	351,0	35,5	24,0	28,7	11,8	Franco
35-60	0,21	0,68	408,7	35,3	20,5	32,5	11,6	Franco-limoso
60-100	0,12	0,88	492,0	36,1	22,5	23,0	18,4	Franco

B extr: boro extraível; EG: elementos grosseiros; AG: areia grossa; AF: areia fina; L: limo; A: argila.

**Local: Marão**

**Perfil 2** (meio da encosta pouco pronunciada)

**Tipo de solo:** Regossolo úmbrico

Declive inferior a 5 %

**(1-0 cm)** - Folhada em decomposição

**Ah1 (0-25 cm)** - Negro 5YR 2,5/1 (h); Franco-limoso, com algum cascalho e algumas pedras ligeiramente boleadas; granuloso fino a médio, moderado; compactidade pequena a média; bastantes poros finos e médios; friável, pouco adesivo, pouco plástico; muitas raízes finas de vegetação herbácea e algumas de castanheiro; húmido; transição muito pouco evidente;

**Ah2 (25-65 cm)** – Negro 5YR 2,5/1 (h); Franco-limoso, com camada muito fina de deposição com material cascalhento ligeiramente boleado, poucas pedras e algum cascalho ligeiramente boleado; granuloso fino, moderado; poroso; compactidade pequena; friável, pouco adesivo, pouco plástico; bastantes raízes finas e médias, poucas grossas de castanheiro; húmido; transição gradual;

**AC (65-150 cm)** – Cinzento muito escuro 5YR 3/1 (h); Franco-limoso, poucos elementos grosseiros, pouco cascalho, algumas pedras ligeiramente boleados; granuloso fino, moderado; bastantes poros, muitos finos e médios; compactidade pequena; friável, pouco adesivo, pouco plástico; bastantes raízes grossas, algumas médias e algumas finas de castanheiro; húmido.

Prof. (cm)	pH		C	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca	Mg	K	Na	Acidez	Al	CTCe	GSB %
	H <sub>2</sub> O	KCL	g kg <sup>-1</sup>	gkg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>			cmol+ kg <sup>-1</sup>						
0-25	4,6	3,7	114,1	6,8	9,0	62,0	0,06	0,24	0,23	0,07	2,61	2,38	3,22	18,9
25-65	4,9	3,9	52,4	5,1	11,0	38,0	0,05	0,11	0,11	0,08	2,16	1,98	2,51	13,8
65-150	5,1	4,0	81,7	4,2	41,0	40,0	0,03	0,05	0,12	0,10	1,65	1,50	1,95	15,7

Prof. (cm)	B extr mg kg <sup>-1</sup>	densidade aparente	EG	AG	AF	L	A	Classificação
			-----g kg <sup>-1</sup> -----					
0-25	1,18	0,52	134,6	14,8	39,5	41,0	4,8	Franco-limoso
25-65	0,29	0,54	205,3	12,8	48,6	37,6	1,0	Franco-limoso
65-150	0,33	0,54	110,2	20,3	33,0	40,0	6,7	Franco-limoso

B extr: boro extraível; EG: elementos grosseiros; AG: areia grossa; AF: areia fina; L: limo; A: argila

**Local: Chãos**

**Perfil 1**

**Tipo de solo:** Cambissolo crómico

Declive: encosta ligeira

**Ap1 (0-13/15 cm)** – Pardo forte 7,5YR 5/6 (s), Pardo 7,5YR 4/4 (h); Franco-limoso, com algum saibro e algum cascalho de xisto achatado e subanguloso, raras pedras de xisto achatado e subanguloso e de quartzo; granuloso fino médio e moderado; compactidade grande; muitos poros muito finos a finos, alguns médios; brando, friável, pouco adesivo, pouco plástico a plástico; algumas raízes finas de vegetação herbácea; seco; transição ondulada pouco evidente;

**Ap2 (13/15-38/40 cm)** – Pardo forte 7,5YR 5/6 (s); Pardo 7,5YR 4/4 (h); Franco-limoso, pouco cascalho, raras pedras e raros calhaus de xisto achatadas subangulosas; granuloso fino, fino a médio, fraco a moderado principalmente junto às raízes; alguns poros finos e muitos muito finos; compactidade média a grande; brando, friável, adesivo e plástico; raras raízes médias de castanheiro e poucas raízes finas de vegetação herbácea; seco; transição ondulada nítida;

**Bw (38/40-100? Cm)** – Pardo amarelado 10YR 6/6 (s), Pardo escuro 10YR 5/6 (h); Franco-limoso, algum saibro e algum cascalho de xisto, algumas pedras de xisto e quartzo, subangulosas; anisoforme, fino a médio, fraco; muitos poros muito finos, alguns finos e médios; compactidade grande; brando, friável, pouco adesivo a adesivo, pouco plástico; poucas raízes finas de castanheiro; seco.

Prof. (cm)	pH		C	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca	Mg	K	Na	Acidez	Al	CTCe	GSB %
	H <sub>2</sub> O	KCL	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>		Cmol+ kg <sup>-1</sup>							
0-13	5,5	3,7	99,2	1,05	21,0	100,0	1,74	0,45	0,20	0,03	0,85	0,73	3,28	74,2
13-40	6,0	4,0	34,2	2,40	6,0	80,0	4,90	1,47	0,14	0,06	0,14	0,09	6,71	97,9
40-100	6,3	3,9	27,8	0,21	5,0	84,0	8,74	2,40	0,13	0,12	0,19	0,13	11,57	98,4

Prof. (cm)	B extr mg kg <sup>-1</sup>	densidade aparente	EG	AG	AF	L	A	Classificação
			-----g kg <sup>-1</sup> -----					
0-13	0,24	0,84	313,4	20,6	38,2	32,0	9,2	Franco-limoso
13-40	0,27	0,99	216,7	25,1	32,1	33,1	9,7	Franco-limoso
40-100	0,11	0,84	402,4	22,0	33,7	32,0	12,3	Franco-limoso

B extr: boro extraível; EG: elementos grosseiros; AG: areia grossa; AF: areia fina; L: limo; A: argila

**Local: Moredo**

**Perfil 1** (castanheiro com desenvolvimento intermédio)

**Tipo de solo:** Leptossolo dístico

Declive: encosta

**Ap1 (0-20/25 cm)** – Pardo claro 10YR 6/3 (s), Pardo 10YR 4/3 (h); Franco-limoso, com muito cascalho e muitas pedras de xisto, achatado e subanguloso; granuloso muito fino a fino principalmente junto às raízes; compactidade pequena a média; poroso; brando, friável, não adesivo, pouco plástico; muitas raízes finas e algumas médias de castanheiro; fresco; transição ondulada;

**AC (20/25-60 cm)** – Pardo muito claro 10YR 7/4 (s), Pardo escuro 10YR 7/6 (h); Franco-limoso, muitas pedras de quartzo e xisto, algum cascalho, até 40 cm, de xisto achatado subanguloso, pequenos veios de material da camada anterior com as mesmas características; granuloso fino junto às raízes, anisoforme fino a médio; poroso; compactidade média; solto, friável, pouco adesivo e pouco plástico; algumas raízes finas e médias de castanheiro; fresco; transição nítida;

**C (60-100 cm)** – Pardo muito claro 10YR 8/3 (s), Pardo escuro 10YR 8/4 (h); xisto bastante alterado destacando-se em placas oblíquas com bolsas de material fino desagregado (rocha em decomposição).

Prof. (cm)	pH		C	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca	Mg	K	Na	Acidez	Al	CTCe	GSB %
	H <sub>2</sub> O	KCL	g kg <sup>-1</sup>	gkg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>		Cmol+ kg <sup>-1</sup>							
0-20	4,9	4,0	19,5	0,77	19,0	52	0,11	0,03	0,09	0,03	1,36	1,19	1,62	15,6
20-60	5,0	4,1	6,9	0,39	5,0	44	0,03	0,03	0,05	0,01	1,29	1,10	1,41	8,4

Prof. (cm)	B extr mg kg <sup>-1</sup>	densidade aparente	EG	AG	AF	L	A	Classificação
			-----g kg <sup>-1</sup> -----					
0-20	0,59	0,85	426,4	28,9	35,6	29,3	6,2	Franco-limoso
20-60	0,16	0,80	441,1	26,9	35,1	33,9	4,1	Franco-limoso

B extr: boro extraível; EG: elementos grosseiros; AG: areia grossa; AF: areia fina; L: limo; A: argila

**Local: Moredo****Perfil 4** (castanheiro com melhor desenvolvimento)**Tipo de solo:** Leptosolo dístico

Declive: encosta

**Ap (0-25/30 cm)** – Pardo amarelado 10YR 5/4 (s), Pardo escuro 10YR 4/4 (h); Franco, com algum cascalho e muitas pedras de xisto achatado, subanguloso; granuloso fino, médio junto às raízes; compactidade pequena; bastante poroso, solto; brando, pouco friável, pouco adesivo, pouco plástico; muitas raízes finas de herbáceas e algumas médias de castanheiro; fresco; transição gradual;

**C (25/30-60 cm)** – Xisto alterado destacando-se em placas oblíquas que se desfazem facilmente originando alguma terra fina.

**R (460-100 cm)** - Xisto

Prof. (cm)	pH		C	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca	Mg	K	Na	Acidez	Al	CTCe	GSB %
	H <sub>2</sub> O	KCL	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	cmol+ kg <sup>-1</sup>								
0-30	5,0	3,9	21,9	1,24	24,0	72,0	0,19	0,13	0,13	0,02	1,67	1,43	2,15	22,3

Prof. (cm)	B extr mg kg <sup>-1</sup>	densidade aparente	EG	AG	AF	L	A	Classificação
			-----g kg <sup>-1</sup> -----					
0-30	0,30	0,74	403,0	31,8	36,7	23,7	7,8	Franco

B extr: boro extraível; EG: elementos grosseiros; AG: areia grossa; AF: areia fina; L: limo; A: argila

**Local: Laviados**

**Perfil 1** (acima do caminho)

**Tipo de solo:** Leptosolo dístico

Declive: cimo da encosta

**Ap1 (0-20/22 cm)** – Pardo escuro 10YR 5/4 (s), Negro 10YR 4/4 (h); Franco, com algum saibro e cascalho e algumas pedras de xisto, achatado e subanguloso; granuloso junto às raízes, fino a médio; bastante poroso; compacidade média; brando, friável, pouco adesivo, pouco plástico; bastantes raízes finas; seco; transição ondulada evidente;

**Ap2 (20/22-34 cm)** – Pardo amarelo acastanhado 10YR 6/8 (s), Pardo amarelado 10YR 5/8 (h); Franco-argiloso, muito cascalho, muitas placas de xisto, algumas desfazem-se com relativa facilidade, mistura de camadas; granuloso fino e médio junto às raízes, moderadamente poroso; compacidade grande; brando, friável, adesivo e pouco plástico; pouco fresco; transição pouco nítida;

**C (34-100 cm)** – Placas de xisto com disposição obliqua que se desfazem com relativa facilidade. Esta camada é semelhante à anterior mas com menos material fino e mais compacto que a anterior.

Prof. (cm)	pH		C	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca	Mg	K	Na	Acidez	Al	CTCe	GSB %
	H <sub>2</sub> O	KCL	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	cmol+ kg <sup>-1</sup>								
<b>0-20</b>	4,6	3,6	12,1	1,05	29,0	64,0	0,29	0,11	0,10	0,07	1,43	1,28	2,00	28,2
<b>20-34</b>	4,7	3,6	4,5	0,68	1,0	44,0	0,54	0,16	0,08	0,03	3,74	3,34	4,56	18,0

Prof. (cm)	B extr mg kg <sup>-1</sup>	densidade aparente	EG	AG	AF	L	A	Classificação
			-----g kg <sup>-1</sup> -----					
<b>0-20</b>	0,19	0,83	562,0	37,1	20,3	27,5	15,1	Franco
<b>20-34</b>	0,24	0,70	378,5	19,6	32,4	16,2	31,8	Franco-argiloso

B extr: boro extraível; EG: elementos grosseiros; AG: areia grossa; AF: areia fina; L: limo; A: argila

## Local: Montesinho

### Perfil 2

**Tipo de solo:** Cambissolo dístico

Declive: baixa ligeira

**Ap (0-13 cm)** – Pardo amarelado 10YR 5/4 (s), Pardo amarelado 10YR 5/6 (h); Franco-limoso, com bastante saibro, bastante cascalho e poucas pedras de xisto, achatado e subanguloso; granuloso fino junto às raízes, moderado; compactidade média; bastante poroso; brando, friável, pouco adesivo, pouco plástico; poucas raízes finas; seco; transição pouco nítida;

**Bw (13-30/32 cm)** – Pardo amarelo avermelhado 7,5YR 6/8 (s), Pardo forte 7,5YR 5/6 (h); Franco-limoso, algum saibro e cascalho, poucas pedras de xisto achatadas e subangulosas; granuloso junto às raízes, moderado e anisoforme fina, média e fraca; moderadamente poroso; compactidade média a grande; brando, friável, adesivo e plástico; muitas raízes finas de vegetação herbácea e raras grossas; pouco fresco; transição ondulada pouco nítida;

**C (30/32-60 cm)** – Pardo forte 7,5YR 5/8 (s), Pardo forte 7,5YR 5/6 (h); Franco, algum saibro e cascalho de xisto achatado subanguloso, algumas pedras de xisto e quartzo subangulosas; anisoforme fino a médio, fraco; moderadamente poroso; compactidade grande; brando, friável, adesivo, plástico; poucas raízes finas e médias; fresco, transição nítida.

**CR (60- 100? cm)** – Cinzento claro 10YR7/2 (s); Xisto bastante alterado, desfaz-se facilmente com uma ligeira pressão.

Prof. (cm)	pH		C	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca	Mg	K	Na	Acidez	Al	CTCe	GSB %
	H <sub>2</sub> O	KCL	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>		cmol+ kg <sup>-1</sup>							
0-13	4,6	3,7	33,8	2,00	3,0	52,0	0,18	0,11	0,10	0,04	2,02	1,78	2,44	17,3
13-32	4,8	3,9	39,9	1,09	3,0	40,0	0,03	0,05	0,09	0,04	2,07	1,89	2,29	9,7
32-60	4,8	3,8	5,5	0,73	1,0	36,0	0,08	0,11	0,05	0,02	2,26	2,07	2,52	10,4

Prof. (cm)	B extr mg kg <sup>-1</sup>	densidade aparente	EG	AG	AF	L	A	Classificação
			-----g kg <sup>-1</sup> -----					
0-13	0,73	0,66	397,5	30,5	21,2	32,9	15,4	Franco-limoso
13-32	0,79	0,77	387,0	24,2	24,6	35,9	15,3	Franco-limoso
32-60	0,26	0,81	443,1	30,8	17,6	26,9	24,7	Franco

B extr: boro extraível; EG: elementos grosseiros; AG: areia grossa; AF: areia fina; L: limo; A: argila.

ANEXO II  
(Funções vulgarmente utilizadas na modelação de relações hipsométricas)

Função	Autor ou designação
(1) $h=e^{\left(\beta_0+\beta_1\frac{1}{d}\right)}$	Michailoff (1943)
(2) $h=\frac{d^2}{\left(\beta_0+\beta_1d+\beta_2d^2\right)}+1,3$	Prodan (1965)
(3) $h=\frac{d}{\left(\beta_0+\beta_1d\right)}$	Prodan (1965)
(4) $h=\beta_0+\beta_1\frac{1}{d}+\beta_2d$	—
(5) $h=\beta_0+\beta_1d+\beta_2d^2$	Trorey (1932)
(6) $h=e^{\left(\beta_0+\beta_1\log d\right)}$	Stoffels e Van Soest (1953)
(7) $h=1,3+\left(\frac{1}{\beta_0+\beta_1\frac{1}{d}}\right)^{\beta_2}$	Petterson (1955)
(8) $h=e^{\left(\beta_0+\beta_1\log d+\beta_2\log^2 d\right)}$	Korsun (1935)
(9) $h=\beta_0+\beta_1\log d$	Henricksen (1950)
(10) $h=\beta_0d^{\beta_1}$	Stoffels e Van Soest (1953)
(11) $h=e^{\beta_0+\beta_1/(d+1)}$	Wykoff <i>et al.</i> (1982)
(12) $h=\beta_0d/(\beta_1+d)$	Bates e Watts (1980)
(13) $h=\beta_0(1-e^{-\beta_1d})$	Meyer (1940)
(14) $h=d^2/(\beta_0+\beta_1d)^2$	Loetsch <i>et al.</i> (1973)
(15) $h=\beta_0e^{\beta_1/d}$	Burkhart e Strub (1974)
(16) $h=10^{\beta_0}d^{\beta_1}$	Larson (1986)
(17) $h=\beta_0d/(d+1)+\beta_1d$	Watts (1983)
(18) $h=\beta_0(d/(1+d))^{\beta_1}$	Curtis (1967)
(19) $h=e^{\beta_0+\beta_1d^{\beta_2}}$	Curtis <i>et al.</i> (1981)
(20) $h=\beta_0/(1+\beta_1e^{-\beta_2d})$	Pearl e Reed (1920)
(21) $h=\beta_0(1-e^{-\beta_1d})^{\beta_2}$	Richards (1959)
(22) $h=\beta_0(1-e^{-\beta_1d^{\beta_2}})$	Yang <i>et al.</i> (1978)
(23) $h=\beta_0e^{-\beta_1e^{-\beta_2d}}$	Winsor (1932)
(24) $h=\left\{y_1^{\beta_0}+\left(\beta_1^{\beta_0}-y_1^{\beta_0}\right)\left[1-e^{-\beta_2(d-d_0)}\right]/\left[1-e^{-\beta_2(d_2-d_0)}\right]\right\}^{1/\beta_0}$	Schnute (1981)
(25) $h=\beta_0d^{\beta_1d^{-\beta_2}}$	Sibbesen (1981)
(26) $h=\beta_0e^{\beta_1/(d+\beta_2)}$	Ratkowsky (1990)
(27) $h=\beta_0/(1+\beta_1^{-1}d^{\beta_2})$	Ratkowsky e Reedy (1986)
(28) $h=\beta_0(1-\beta_1e^{-\beta_2d})^d$	Richards (1959)

### ANEXO III

(Simulação da tabela de produção com uma silvicultura baseada numa equação de redução de densidade que traduz a silvicultura das tabelas de produção inglesas para o castanheiro)

Tabela de produção para o castanheiro em regime de alto fuste SI<sub>45</sub>=24 m

**Simulação:**

Ficheiro Editar Ver Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda

**TABELA DE PRODUÇÃO PARA UMA SILVICULTURA DAS TABELAS DE PRODUÇÃO INGLESAS**

SI 24

idade do primeiro desbaste: 20  
idade do último desbaste: 40  
periodicidade de desbaste: 5

Gráf Nutri  
Gráf Biom  
Biomassa

Gráf Acrésc

t (anos)	POVOAMENTO PRINCIPAL (APÓS DESBASTE)						DESBASTES			Vtot (m³ha⁻¹)	Acréscimos	
	hdom (m)	N (árvores ha⁻¹)	dg (cm)	hmed (m)	G (m³ha⁻¹)	Vp (m³ha⁻¹)	N <sub>s</sub> (árvores ha⁻¹)	V <sub>s</sub> (m³ha⁻¹)	V <sub>s-acum</sub> (m³ha⁻¹)		ama (m³ha⁻¹ano⁻¹)	ac (m³ha⁻¹ano⁻¹)
15	9.5	1250	10.48	8.38								
20	13.0	607	17.90	12.23	15.27	78.47	643	22.07	22.07	100.54	5.03	14.18
25	16.1	361	24.64	15.44	17.22	111.71	246	37.67	59.74	171.45	6.86	15.63
30	18.6	245	30.58	18.11	17.97	136.71	117	53.15	112.90	249.60	8.32	15.79
35	20.8	181	35.75	20.33	18.17	155.13	64	60.54	173.44	328.57	9.39	15.15
40	22.5	143	40.19	22.16	18.15	168.86	38	62.01	235.45	404.31	10.11	5.56
45	24.0	143	42.10	23.51	19.91	196.66	0	0.00	235.45	432.11	9.60	5.08
50	25.2	143	43.70	24.64	21.46	222.07	0	0.00	235.45	457.52	9.15	4.60
55	26.3	143	45.05	25.59	22.80	245.05	0	0.00	235.45	480.50	8.74	4.13
60	27.1	143	46.19	26.39	23.97	265.69	0	0.00	235.45	501.14	8.35	3.70
65	27.9	143	47.17	27.07	24.99	284.19	0	0.00	235.45	519.63	7.99	3.31
70	28.5	143	48.00	27.66	25.89	300.73	0	0.00	235.45	536.18	7.66	

tabela de produção / gráficos / auxiliar / Biom Min / Graf biom / Graf nutrientes /

Ficheiro Editar Ver Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda

**BIOMASSA E MINERALOMASSA DO POVOAMENTO PRINCIPAL PARA UMA SILVICULTURA DAS TABELAS INGLESAS**

Gráf Nutri  
Gráf Biom  
Tab prod

t	POVOAMENTO PRINCIPAL (APÓS DESBASTE)							Biomassa (Mg ha⁻¹)					Carbono (Mg ha⁻¹)				
	hdom	N	dg	hmed	G	Vp	Lenho	W_Rviv	N_Casc	W_Ftot	Tronc	W_tot	C_Lenho	C_Rviv	C_Casc	C_Ftot	C_tot
	15	9.5	1250	10.48	8.38		0.00										
20	13.0	607	17.90	12.23	15.27	78.47	37.33	10.47	8.08	0.78	45.41	56.66	18.07	5.06	4.28	0.40	27.81
25	16.1	361	24.64	15.44	17.22	111.71	51.24	14.90	8.66	1.12	59.90	75.91	24.80	7.20	4.59	0.57	37.15
30	18.6	245	30.58	18.11	17.97	136.71	61.19	18.23	8.73	1.37	69.92	89.52	29.61	8.81	4.63	0.69	43.75
35	20.8	181	35.75	20.33	18.17	155.13	68.22	20.69	8.61	1.55	76.84	99.08	33.02	10.00	4.56	0.79	48.37
40	22.5	143	40.19	22.16	18.15	168.86	73.28	22.52	8.44	1.69	81.72	105.93	35.46	10.89	4.47	0.86	51.68
45	24.0	143	42.10	23.51	19.91	196.66	85.25	26.23	9.20	1.97	94.44	122.64	41.26	12.68	4.87	1.00	59.81
50	25.2	143	43.70	24.64	21.46	222.07	96.16	29.62	9.85	2.22	106.01	137.85	46.54	14.32	5.22	1.13	67.20
55	26.3	143	45.05	25.59	22.80	245.05	106.02	32.68	10.42	2.45	116.43	151.57	51.31	15.80	5.52	1.24	73.87
60	27.1	143	46.19	26.39	23.97	265.69	114.86	35.44	10.91	2.66	125.76	163.86	55.59	17.13	5.78	1.35	79.84
65	27.9	143	47.17	27.07	24.99	284.19	122.77	37.90	11.33	2.84	134.10	174.85	59.41	18.32	6.01	1.44	85.18
70	28.5	143	48.00	27.66	25.89	300.73	129.84	40.11	11.71	3.01	141.54	184.66	62.83	19.39	6.21	1.53	89.96

t	POVOAMENTO PRINCIPAL (APÓS DESBASTE)							POVOAMENTO SECUNDÁRIO					Carbono (Mg ha⁻¹)				
	Biomassa (Mg ha⁻¹)							Biomassa (Mg ha⁻¹)					Carbono (Mg ha⁻¹)				
	Lenho	W_Rviv	W_Casc	W_Ftot	N	Tronc	W_tot	Lenho	W_Rviv	N_Casc	W_Ftot	Tronc	W_tot	C_Lenho	C_Rviv	C_Casc	C_Ftot
15																	
20	37.33	10.47	8.08	0.78	45.41	56.66	9.70	2.91	2.46	0.22	12.17	15.30	4.70	1.41	1.30	0.11	7.52
25	51.24	14.90	8.66	1.12	59.90	75.91	16.45	4.97	2.91	0.38	19.36	24.71	7.96	2.40	1.54	0.19	12.10
30	61.19	18.23	8.73	1.37	69.92	89.52	23.08	7.01	3.29	0.53	26.36	33.90	11.17	3.39	1.74	0.27	16.57
35	68.22	20.69	8.61	1.55	76.84	99.08	25.36	7.98	3.13	0.61	28.49	37.08	12.27	3.86	1.66	0.31	18.10
40	73.28	22.52	8.44	1.69	81.72	105.93	24.69	8.18	2.68	0.62	27.36	36.16	11.95	3.95	1.42	0.31	17.63
45	85.25	26.23	9.20	1.97	94.44	122.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50	96.16	29.62	9.85	2.22	106.01	137.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
55	106.02	32.68	10.42	2.45	116.43	151.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60	114.86	35.44	10.91	2.66	125.76	163.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
65	122.77	37.90	11.33	2.84	134.10	174.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
70	129.84	40.11	11.71	3.01	141.54	184.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

tabela de produção / gráficos / auxiliar / Biom Min / Graf biom / Graf nutrientes /

Tabela de produção para o castanheiro em regime de alto fuste SI<sub>45</sub>=22 m

Simulação:

**TABELA DE PRODUÇÃO PARA UMA SILVICULTURA DAS TABELAS DE PRODUÇÃO INGLESAS**

SI 22

idade do primeiro desbaste: 20  
idade do último desbaste: 40  
periodicidade de desbaste: 5

[Gráf Nutri](#)  
[Gráf Biom](#)  
[Biomassa](#) [Gráf Acrésc](#)

t (anos)	POVOAMENTO PRINCIPAL (APÓS DESBASTE)						DESBASTES			Vtot (m³ha⁻¹)	Acréscimos (m³ha⁻¹ano⁻¹)	
	hdom (m)	N (árvores ha⁻¹)	dg (cm)	hmed (m)	G (m³ha⁻¹)	Vp (m³ha⁻¹)	Ns (árvores ha⁻¹)	Vs (m³ha⁻¹)	Vs-acum (m³ha⁻¹)		ama	ac
15	7.8	1250	8.32	6.83								
20	11.0	645	15.00	10.34	11.40	49.50	605	16.16	16.16	65.66	3.28	10.53
25	13.9	401	21.18	13.36	14.12	79.22	244	22.95	39.11	118.33	4.73	12.46
30	16.4	280	26.71	15.96	15.71	105.26	120	36.28	75.39	180.65	6.02	13.38
35	18.6	213	31.57	18.17	16.65	127.09	68	45.07	120.46	247.55	7.07	13.51
40	20.4	171	35.78	20.06	17.23	145.18	41	49.45	169.91	315.10	7.88	5.78
45	22.0	171	37.84	21.51	19.27	174.10	0	0.00	169.91	344.02	7.64	5.50
50	23.3	171	39.59	22.75	21.09	201.58	0	0.00	169.91	371.49	7.43	5.13
55	24.5	171	41.09	23.81	22.73	227.25	0	0.00	169.91	397.16	7.22	4.74
60	25.5	171	42.39	24.71	24.18	250.97	0	0.00	169.91	420.89	7.01	4.35
65	26.4	171	43.50	25.50	25.47	272.74	0	0.00	169.91	442.65	6.81	3.98
70	27.1	171	44.47	26.17	26.62	292.63	0	0.00	169.91	462.54	6.61	

**BIOMASSA E MINERALOMASSA DO POVOAMENTO PRINCIPAL PARA UMA SILVICULTURA DAS TABELAS INGLESAS**

[Gráf Nutri](#)  
[Gráf Biom](#)  
[Tab prod](#)

t	POVOAMENTO PRINCIPAL (APÓS DESBASTE)						Biomassa (Mg ha⁻¹)						Carbono (Mg ha⁻¹)							
	hdom	N	dg	hmed	G	Vp	W	Lenho	W Rviv	W Casc	W Ftot	Tronc	W tot	C	Lenho	C Rviv	C Casc	C Ftot	C tot	
15	7.8	1250	8.32	6.83	0.00	0.00														
20	11.0	645	15.00	10.34	11.40	49.50	23.87	6.60	6.20	0.50	30.07	37.17	11.55	3.19	3.29	0.25	18.28			
25	13.9	401	21.18	13.36	14.12	79.22	36.76	10.57	7.27	0.79	44.03	55.39	17.79	5.11	3.85	0.40	27.15			
30	16.4	280	26.71	15.96	15.71	105.26	47.63	14.04	7.80	1.05	55.42	70.52	23.05	6.79	4.13	0.53	34.50			
35	18.6	213	31.57	18.17	16.65	127.09	56.49	16.95	8.05	1.27	64.54	82.76	27.34	8.19	4.27	0.64	40.44			
40	20.4	171	35.78	20.06	17.23	145.18	63.69	19.36	8.17	1.45	71.86	92.68	30.82	9.36	4.33	0.74	45.25			
45	22.0	171	37.84	21.51	19.27	174.10	76.26	23.22	9.05	1.74	85.31	110.27	36.91	11.23	4.80	0.88	53.81			
50	23.3	171	39.59	22.75	21.09	201.58	88.17	26.89	9.84	2.02	98.01	126.91	42.67	13.00	5.21	1.02	61.90			
55	24.5	171	41.09	23.81	22.73	227.25	99.27	30.31	10.53	2.27	109.81	142.39	48.04	14.65	5.58	1.15	69.43			
60	25.5	171	42.39	24.71	24.18	250.97	109.52	33.47	11.15	2.51	120.67	156.65	53.00	16.18	5.91	1.27	76.37			
65	26.4	171	43.50	25.50	25.47	272.74	118.90	36.38	11.70	2.73	130.60	169.70	57.54	17.59	6.20	1.38	82.71			
70	27.1	171	44.47	26.17	26.62	292.63	127.46	39.03	12.18	2.93	139.64	181.60	61.68	18.87	6.46	1.48	88.49			

Tabela de produção para o castanheiro em regime de alto fuste SI<sub>45</sub>=20 m

**Simulação:**

TABELA DE PRODUÇÃO PARA UMA SILVICULTURA DAS TABELAS DE PRODUÇÃO INGLESAS												
SI 20												
idade do primeiro desbaste:	25											
idade do último desbaste:	60											
periodicidade de desbaste:	5											
POVOAMENTO PRINCIPAL (APÓS DESBASTE)							DESBASTES			Vtot (m³ha⁻¹)	Acréscimos ama ac	
t (anos)	hdom (m)	N (árvo ha⁻¹)	dg (cm)	hmed (m)	G (m³ha⁻¹)	Vp (m³ha⁻¹)	N <sub>s</sub> (árvo ha⁻¹)	V <sub>s</sub> (m³ha⁻¹)	V <sub>s-accum</sub> (m³ha⁻¹)		ama	ac
20	9.3	1250	10.20	8.18								
25	11.9	811	15.23	11.00	14.77	68.24	439	12.40	12.40	80.64	3.23	9.58
30	14.3	586	19.78	13.47	18.02	101.96	225	14.17	26.57	128.53	4.28	10.87
35	16.5	456	23.84	15.63	20.36	133.67	130	22.65	49.22	182.89	5.23	11.53
40	18.4	375	27.40	17.51	22.10	162.49	81	28.81	78.03	240.53	6.01	11.67
45	20.0	321	30.49	19.14	23.44	188.39	54	32.45	110.49	298.88	6.64	11.45
50	21.4	284	33.16	20.54	24.53	211.72	37	33.92	144.40	356.12	7.12	10.99
55	22.7	258	35.45	21.77	25.48	232.96	26	33.72	178.12	411.08	7.47	10.40
60	23.8	240	37.41	22.82	26.35	252.61	18	32.33	210.45	463.06	7.72	5.45
65	24.7	240	38.65	23.69	28.13	279.88	0	0.00	210.45	490.34	7.54	5.10
70	25.6	240	39.75	24.45	29.74	305.40	0	0.00	210.45	515.85	7.37	4.75
75	26.3	240	40.71	25.12	31.20	329.15	0	0.00	210.45	539.60	7.19	

BIOMASSA E MINERALOMASSA DO POVOAMENTO PRINCIPAL PARA UMA SILVICULTURA DAS TABELAS INGLESAS																												
POVOAMENTO PRINCIPAL (APÓS DESBASTE)																												
t	POVOAMENTO PRINCIPAL (APÓS DESBASTE)						Biomassa (Mg ha⁻¹)						Carbono (Mg ha⁻¹)															
	hdom	N	dg	hmed	G	Vp	W	Lenho	W	Rviv	W	Casc	W	Ftot	W	Tronc	W	tot	C	Lenho	C	Rviv	C	Casc	C	Ftot	C	tot
20	9.3	1250	10.20	8.18	0.00	0.00																						
25	11.9	811	15.23	11.00	14.77	68.24	33.13	9.10	8.02	0.68	41.15	50.93	16.03	4.40	4.25	0.35	25.03		23.29	6.57	4.97	0.52	35.36					
30	14.3	586	19.78	13.47	18.02	101.96	48.13	13.60	9.38	1.02	57.52	72.14	23.29	6.57	4.97	0.52	35.36		29.96	8.62	5.46	0.68	44.71					
35	16.5	456	23.84	15.63	20.36	133.67	61.90	17.83	10.29	1.34	72.20	91.36	35.91	10.48	5.79	0.82	53.01		35.91	10.48	5.79	0.82	53.01					
40	18.4	375	27.40	17.51	22.10	162.49	74.21	21.67	10.92	1.63	85.13	108.43	41.21	12.15	6.04	0.96	60.35		41.21	12.15	6.04	0.96	60.35					
45	20.0	321	30.49	19.14	23.44	188.39	85.14	25.13	11.39	1.88	96.54	123.55	45.94	13.65	6.24	1.07	66.90		45.94	13.65	6.24	1.07	66.90					
50	21.4	284	33.16	20.54	24.53	211.72	94.93	28.24	11.77	2.12	106.69	137.05	50.24	15.02	6.41	1.18	72.85		50.24	15.02	6.41	1.18	72.85					
55	22.7	258	35.45	21.77	25.48	232.96	103.81	31.07	12.09	2.33	115.90	149.30	54.21	16.29	6.57	1.28	78.35		54.21	16.29	6.57	1.28	78.35					
60	23.8	240	37.41	22.82	26.35	252.61	112.02	33.69	12.40	2.53	124.42	160.64	59.98	18.05	6.98	1.42	86.42		59.98	18.05	6.98	1.42	86.42					
65	24.7	240	38.65	23.69	28.13	279.88	123.93	37.33	13.17	2.80	137.09	177.22	65.36	19.69	7.35	1.55	93.94		65.36	19.69	7.35	1.55	93.94					
70	25.6	240	39.75	24.45	29.74	305.40	135.05	40.73	13.86	3.05	148.91	192.69	70.36	21.22	7.68	1.67	100.92		70.36	21.22	7.68	1.67	100.92					
75	26.3	240	40.71	25.12	31.20	329.15	145.38	43.90	14.48	3.29	159.86	207.05																

# Tabela de produção para o castanheiro em regime de alto fuste SI<sub>45</sub>=18 m

## Simulação:

**TABELA DE PRODUÇÃO PARA UMA SILVICULTURA DAS TABELAS DE PRODUÇÃO INGLESAS**

**SI 18**

idade do primeiro desbaste: 25  
idade do último desbaste: 65  
periodicidade de desbaste: 5

[Gráf Nutri](#)  
[Gráf Biom](#)  
[Biomassa](#) [Gráf Acrésc](#)

t (anos)	POVOAMENTO PRINCIPAL (APÓS DESBASTE)						DESBASTES			Vtot (m³ha⁻¹)	Acréscimos (m³ha⁻¹ano⁻¹)	
	hdom (m)	N (árv ha⁻¹)	dg (cm)	hmed (m)	G (m²ha⁻¹)	Vp (m³ha⁻¹)	N <sub>s</sub> (árv ha⁻¹)	V <sub>s</sub> (m³ha⁻¹)	V <sub>s</sub> -acum (m³ha⁻¹)		ama	ac
20	7.8	1250	8.26	6.79								
25	10.2	847	12.78	9.36	10.87	42.73	403	11.24	11.24	53.97	2.16	7.10
30	12.4	632	16.95	11.66	14.27	69.89	215	8.33	19.58	89.47	2.98	8.49
35	14.5	505	20.72	13.73	17.01	98.09	128	14.24	33.82	131.91	3.77	9.43
40	16.3	423	24.08	15.57	19.25	125.88	82	19.33	53.15	179.03	4.48	9.94
45	18.0	368	27.04	17.20	21.12	152.57	55	23.03	76.18	228.76	5.08	10.12
50	19.5	329	29.64	18.63	22.73	177.93	38	25.24	101.42	279.35	5.59	10.03
55	20.8	302	31.90	19.90	24.16	201.95	27	26.12	127.54	329.50	5.99	9.76
60	21.9	283	33.86	21.02	25.47	224.82	19	25.92	153.46	378.29	6.30	9.36
65	23.0	269	35.56	22.00	26.70	246.76	14	24.89	178.35	425.11	6.54	5.37
70	23.9	269	36.75	22.84	28.53	273.62	0	0.00	178.35	451.97	6.46	5.11
75	24.7	269	37.82	23.58	30.21	299.15	0	0.00	178.35	477.50	6.37	

**BIOMASSA E MINERALOMASSA DO POVOAMENTO PRINCIPAL PARA UMA SILVICULTURA DAS TABELAS INGLESAS**

[Gráf Nutri](#)  
[Gráf Biom](#)  
[Tab prod](#)

POVOAMENTO PRINCIPAL (APÓS DESBASTE)

t	POVOAMENTO PRINCIPAL (APÓS DESBASTE)						Biomassa (Mg ha⁻¹)						Carbono (Mg ha⁻¹)				
	hdom	N	dg	hmed	G	Vp	Lenho	W Rviv/N	Casc	W Ftot/	Tronc	W tot	C Lenho	C Rviv	C Casc	C Ftot	C tot
20	7.8	1250	8.26	6.79		0.00											
25	10.2	847	12.78	9.36	10.87	42.73	21.05	5.70	6.07	0.43	27.11	33.24	10.19	2.75	3.22	0.22	16.37
30	12.4	632	16.95	11.66	14.27	69.89	33.41	9.32	7.61	0.70	41.03	51.05	16.17	4.51	4.04	0.35	25.07
35	14.5	505	20.72	13.73	17.01	98.09	45.95	13.08	8.79	0.98	54.75	68.81	22.24	6.32	4.66	0.50	33.72
40	16.3	423	24.08	15.57	19.25	125.88	58.12	16.79	9.72	1.26	67.84	85.89	28.13	8.12	5.15	0.64	42.03
45	18.0	368	27.04	17.20	21.12	152.57	69.69	20.35	10.47	1.53	80.15	102.03	33.73	9.84	5.55	0.77	49.88
50	19.5	329	29.64	18.63	22.73	177.93	80.60	23.73	11.10	1.78	91.70	117.21	39.00	11.47	5.88	0.90	57.26
55	20.8	302	31.90	19.90	24.16	201.95	90.90	26.94	11.66	2.02	102.55	131.51	43.99	13.02	6.18	1.02	64.21
60	21.9	283	33.86	21.02	25.47	224.82	100.68	29.99	12.17	2.25	112.86	145.09	48.73	14.50	6.45	1.14	70.81
65	23.0	269	35.56	22.00	26.70	246.76	110.08	32.91	12.67	2.47	122.74	158.12	53.27	15.91	6.71	1.25	77.15
70	23.9	269	36.75	22.84	28.53	273.62	121.86	36.49	13.46	2.74	135.32	174.55	58.97	17.64	7.13	1.39	85.14
75	24.7	269	37.82	23.58	30.21	299.15	133.04	39.90	14.19	2.99	147.22	190.12	64.38	19.29	7.52	1.52	92.71

POVOAMENTO PRINCIPAL (APÓS DESBASTE) | POVOAMENTO SECUNDÁRIO

t	Biomassa (Mg ha⁻¹)						Biomassa (Mg ha⁻¹)						Carbono (Mg ha⁻¹)				
	Lenho	W Rviv	W Casc	W Ftot	Tronc	W tot	Lenho	W Rviv	W Casc	W Ftot	Tronc	W tot	C Lenho	C Rviv	C Casc	C Ftot	C tot
20																	
25	21.05	5.70	6.07	0.43	27.11	33.24	4.83	1.48	1.89	0.11	6.72	8.32	2.34	0.72	1.00	0.06	4.11
30	33.41	9.32	7.61	0.70	41.03	51.05	1.83	1.10	1.22	0.08	3.05	4.23	0.89	0.53	0.65	0.04	2.11
35	45.95	13.08	8.79	0.98	54.75	68.81	3.98	1.88	1.28	0.14	5.26	7.28	1.93	0.91	0.68	0.07	3.58
40	58.12	16.79	9.72	1.26	67.84	85.89	5.69	2.55	1.27	0.19	6.96	9.70	2.75	1.23	0.67	0.10	4.76
45	69.69	20.35	10.47	1.53	80.15	102.03	6.67	3.04	1.17	0.23	7.84	11.11	3.23	1.47	0.62	0.12	5.43
50	80.60	23.73	11.10	1.78	91.70	117.21	6.92	3.33	0.99	0.25	7.90	11.48	3.35	1.61	0.52	0.13	5.61
55	90.90	26.94	11.66	2.02	102.55	131.51	6.53	3.44	0.75	0.26	7.28	10.98	3.16	1.67	0.40	0.13	5.35
60	100.68	29.99	12.17	2.25	112.86	145.09	5.65	3.42	0.47	0.26	6.13	9.80	2.74	1.65	0.25	0.13	4.77
65	110.08	32.91	12.67	2.47	122.74	158.12	4.43	3.28	0.18	0.25	4.61	8.14	2.14	1.59	0.10	0.13	3.95
70	121.86	36.49	13.46	2.74	135.32	174.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
75	133.04	39.90	14.19	2.99	147.22	190.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabela de produção para o castanheiro em regime de alto fuste SI<sub>45</sub>=16 m

Simulação:

**TABELA DE PRODUÇÃO PARA UMA SILVICULTURA DAS TABELAS DE PRODUÇÃO INGLESAS**

SI **16**

idade do primeiro desbaste: 25  
 idade do último desbaste: 65  
 periodicidade de desbaste: 5

[Gráf Nutri](#)  
[Gráf Biom](#)  
[Biomassa](#) [Gráf Acrésc](#)

t (anos)	POVOAMENTO PRINCIPAL (APÓS DESBASTE)						DESBASTES			Vtot (m³ha⁻¹)	Acréscimos (m³ha⁻¹ano⁻¹)	
	hdom (m)	N (árvores ha⁻¹)	dg (cm)	hmed (m)	G (m³ha⁻¹)	Vp (m³ha⁻¹)	N <sub>s</sub> (árvores ha⁻¹)	V <sub>s</sub> (m³ha⁻¹)	V <sub>s-acum</sub> (m³ha⁻¹)		ama	ac
20	6.5	1250	6.57	5.57								
25	8.6	885	10.56	7.87	7.75	25.63	365	9.61	9.61	35.24	1.41	5.06
30	10.7	682	14.30	9.98	10.96	45.92	202	5.02	14.64	60.56	2.02	6.35
35	12.6	558	17.74	11.91	13.79	68.99	124	8.68	23.32	92.31	2.64	7.37
40	14.4	477	20.86	13.67	16.29	93.52	81	12.33	35.65	129.17	3.23	8.10
45	16.0	421	23.65	15.26	18.51	118.62	56	15.39	51.03	169.65	3.77	8.54
50	17.5	382	26.14	16.69	20.50	143.74	39	17.60	68.63	212.37	4.25	8.75
55	18.8	354	28.34	17.98	22.33	168.57	28	18.92	87.55	256.13	4.66	8.77
60	20.0	334	30.28	19.13	24.02	193.00	20	19.40	106.96	299.96	5.00	8.64
65	21.1	319	31.99	20.16	25.63	217.02	15	19.16	126.12	343.13	5.28	5.62
70	22.1	319	33.26	21.05	27.72	245.11	0	0.00	126.12	371.22	5.30	5.47
75	23.0	319	34.42	21.85	29.68	272.44	0	0.00	126.12	398.55	5.31	

**BIOMASSA E MINERALOMASSA DO POVOAMENTO PRINCIPAL PARA UMA SILVICULTURA DAS TABELAS INGLESAS**

[Gráf Nutri](#)  
[Gráf Biom](#)  
[Tab prod](#)

POVOAMENTO PRINCIPAL (APÓS DESBASTE)

t	hdom	N	dg	hmed	G	Vp	Biomassa (Mg ha⁻¹)					Carbono (Mg ha⁻¹)								
							Lenho	W Rviv	N Casc	W Ftot	Tronc	W tot	C Lenho	C Rviv	C Casc	C Ftot	C tot			
20	6.5	1250	6.57	5.57	0.00	0.00														
25	8.6	885	10.56	7.87	7.75	25.63	12.83	3.42	4.46	0.26	17.29	20.96	6.21	1.65	2.36	0.13	10.35			
30	10.7	682	14.30	9.98	10.96	45.92	22.26	6.12	6.01	0.46	28.27	34.86	10.78	2.96	3.18	0.23	17.15			
35	12.6	558	17.74	11.91	13.79	68.99	32.74	9.20	7.31	0.69	40.05	49.94	15.85	4.45	3.87	0.35	24.52			
40	14.4	477	20.86	13.67	16.29	93.52	43.71	12.47	8.41	0.94	52.13	65.54	21.16	6.03	4.46	0.47	32.12			
45	16.0	421	23.65	15.26	18.51	118.62	54.82	15.82	9.37	1.19	64.19	81.19	26.53	7.65	4.97	0.60	39.75			
50	17.5	382	26.14	16.69	20.50	143.74	65.85	19.17	10.21	1.44	76.06	96.67	31.87	9.27	5.41	0.73	47.28			
55	18.8	354	28.34	17.98	22.33	168.57	76.71	22.48	10.98	1.69	87.69	111.86	37.12	10.87	5.82	0.85	54.67			
60	20.0	334	30.28	19.13	24.02	193.00	87.36	25.74	11.69	1.93	99.05	126.72	42.28	12.44	6.20	0.98	61.90			
65	21.1	319	31.99	20.16	25.63	217.02	97.82	28.94	12.36	2.17	110.19	141.30	47.34	13.99	6.55	1.10	68.99			
70	22.1	319	33.26	21.05	27.72	245.11	110.25	32.69	13.29	2.45	123.54	158.69	53.36	15.80	7.04	1.24	77.45			
75	23.0	319	34.42	21.85	29.68	272.44	122.32	36.34	14.15	2.73	136.47	175.54	59.20	17.57	7.50	1.38	85.65			

t	POVOAMENTO PRINCIPAL (APÓS DESBASTE)						POVOAMENTO SECUNDÁRIO						Carbono (Mg ha⁻¹)				
	W Lenho	W Rviv	W Casc	W Ftot	N Tronc	W tot	W Lenho	W Rviv	W Casc	W Ftot	N Tronc	W tot	C Lenho	C Rviv	C Casc	C Ftot	C tot
20																	
25	12.83	3.42	4.46	0.26	17.29	20.96	4.69	1.27	1.96	0.10	6.64	8.01	2.27	0.61	1.04	0.05	3.97
30	22.26	6.12	6.01	0.46	28.27	34.86	0.81	0.66	1.19	0.05	2.00	2.71	0.39	0.32	0.63	0.03	1.37
35	32.74	9.20	7.31	0.69	40.05	49.94	1.82	1.14	1.13	0.09	2.95	4.19	0.88	0.55	0.60	0.04	2.08
40	43.71	12.47	8.41	0.94	52.13	65.54	2.85	1.63	1.07	0.12	3.92	5.67	1.38	0.79	0.57	0.06	2.79
45	54.82	15.82	9.37	1.19	64.19	81.19	3.59	2.03	0.97	0.15	4.55	6.74	1.74	0.98	0.51	0.08	3.31
50	65.85	19.17	10.21	1.44	76.06	96.67	3.90	2.32	0.82	0.18	4.72	7.22	1.89	1.12	0.43	0.09	3.53
55	76.71	22.48	10.98	1.69	87.69	111.86	3.79	2.49	0.63	0.19	4.41	7.10	1.83	1.21	0.33	0.10	3.47
60	87.36	25.74	11.69	1.93	99.05	126.72	3.29	2.56	0.40	0.19	3.69	6.44	1.59	1.24	0.21	0.10	3.14
65	97.82	28.94	12.36	2.17	110.19	141.30	2.47	2.53	0.16	0.19	2.63	5.35	1.20	1.22	0.08	0.10	2.60
70	110.25	32.69	13.29	2.45	123.54	158.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
75	122.32	36.34	14.15	2.73	136.47	175.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

## Tabela de produção para o castanheiro em regime de alto fuste SI<sub>45</sub>=14 m

### Simulação:

TABELA DE PRODUÇÃO PARA UMA SILVICULTURA DAS TABELAS DE PRODUÇÃO INGLESAS															
SI		14													
idade do primeiro desbaste:		27													
idade do último desbaste:		57													
periodicidade de desbaste:		5													
		<a href="#">Gráf Nutri</a>										<a href="#">Gráf Acrésc</a>			
		<a href="#">Gráf Biom</a>													
		<a href="#">Biomassa</a>													
t (anos)	POVOAMENTO PRINCIPAL (APÓS DESBASTE)						DESBASTES			Vtot (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	Acréscimos				
	hdom (m)	N (árv ha <sup>-1</sup> )	dg (cm)	hmed (m)	G (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	Vp (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	N <sub>s</sub> (árv ha <sup>-1</sup> )	V <sub>s</sub> (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	V <sub>s</sub> -acum (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )		ama (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )	ac (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )			
22	6.1	1250	6.03	5.18											
27	7.9	955	9.37	7.16	6.58	19.81	295	8.67	8.67	28.48	1.05	3.89			
32	9.7	779	12.52	9.01	9.58	36.24	177	3.03	11.70	47.94	1.50	4.93			
37	11.5	664	15.45	10.72	12.45	56.06	114	4.83	16.53	72.59	1.96	5.82			
42	13.1	586	18.14	12.31	15.15	78.35	78	6.80	23.33	101.68	2.42	6.52			
47	14.6	531	20.59	13.78	17.69	102.37	55	8.60	31.93	134.30	2.86	7.04			
52	16.0	491	22.81	15.12	20.08	127.56	40	10.00	41.93	169.49	3.26	7.37			
57	17.3	462	24.81	16.35	22.35	153.51	29	10.91	52.85	206.35	3.62	6.20			
62	18.5	462	26.35	17.42	25.21	184.52	0	0.00	52.85	237.37	3.83	6.36			
67	19.5	462	27.76	18.41	27.98	216.32	0	0.00	52.85	269.17	4.02	6.42			
72	20.5	462	29.05	19.30	30.64	248.41	0	0.00	52.85	301.26	4.18	6.39			
77	21.4	462	30.22	20.12	33.17	280.39	0	0.00	52.85	333.23	4.33				

BIOMASSA E MINERALOMASSA DO POVOAMENTO PRINCIPAL PARA UMA SILVICULTURA DAS TABELAS INGLESAS																	
<a href="#">Gráf Nutri</a>																	
<a href="#">Gráf Biom</a>																	
<a href="#">Tab prod</a>																	
POVOAMENTO PRINCIPAL (APÓS DESBASTE)																	
t	POVOAMENTO PRINCIPAL (APÓS DESBASTE)						Biomassa (Mg ha <sup>-1</sup> )						Carbono (Mg ha <sup>-1</sup> )				
	hdom	N	dg	hmed	G	Vp	Lenho	W Rviv	W Casc	W Ftot	Tronc	W tot	C Lenho	C Rviv	C Casc	C Ftot	C tot
22	6.1	1250	6.03	5.18	0.00	0.00											
27	7.9	955	9.37	7.16	6.58	19.81	10.04	2.64	3.86	0.20	13.90	16.75	4.86	1.28	2.05	0.10	8.29
32	9.7	779	12.52	9.01	9.58	36.24	17.83	4.83	5.37	0.36	23.19	28.39	8.63	2.34	2.84	0.18	13.99
37	11.5	664	15.45	10.72	12.45	56.06	27.01	7.48	6.74	0.56	33.75	41.79	13.07	3.61	3.57	0.28	20.54
42	13.1	586	18.14	12.31	15.15	78.35	37.20	10.45	8.00	0.78	45.19	56.43	18.00	5.05	4.24	0.40	27.69
47	14.6	531	20.59	13.78	17.69	102.37	48.06	13.65	9.15	1.02	57.21	71.89	23.26	6.60	4.85	0.52	35.23
52	16.0	491	22.81	15.12	20.08	127.56	59.36	17.01	10.22	1.28	69.59	87.88	28.73	8.22	5.42	0.65	43.02
57	17.3	462	24.81	16.35	22.35	153.51	70.95	20.47	11.23	1.54	82.18	104.19	34.34	9.90	5.95	0.78	50.96
62	18.5	462	26.35	17.42	25.21	184.52	84.98	24.61	12.54	1.85	97.52	123.98	41.13	11.90	6.65	0.94	60.61
67	19.5	462	27.76	18.41	27.98	216.32	99.31	28.85	13.80	2.16	113.11	144.13	48.06	13.95	7.32	1.10	70.42
72	20.5	462	29.05	19.30	30.64	248.41	113.72	33.13	15.01	2.48	128.73	164.34	55.03	16.02	7.96	1.26	80.27
77	21.4	462	30.22	20.12	33.17	280.39	128.04	37.40	16.15	2.80	144.18	184.38	61.96	18.08	8.56	1.42	90.02
POVOAMENTO PRINCIPAL (APÓS DESBASTE)										POVOAMENTO SECUNDÁRIO							
Biomassa (Mg ha <sup>-1</sup> )						Biomassa (Mg ha <sup>-1</sup> )						Carbono (Mg ha <sup>-1</sup> )					
t	W Lenho	W Rviv	W Casc	W Ftot	W Tronc	W tot	W Lenho	W Rviv	W Casc	W Ftot	W Tronc	W tot	C Lenho	C Rviv	C Casc	C Ftot	C tot
22																	
27	10.04	2.64	3.86	0.20	13.90	16.75	4.41	1.14	1.91	0.09	6.33	7.56	2.14	0.55	1.02	0.04	3.75
32	17.83	4.83	5.37	0.36	23.19	28.39	0.05	0.40	1.09	0.03	1.14	1.57	0.02	0.19	0.58	0.02	0.81
37	27.01	7.48	6.74	0.56	33.75	41.79	0.13	0.64	0.94	0.05	1.07	1.76	0.07	0.31	0.50	0.02	0.89
42	37.20	10.45	8.00	0.78	45.19	56.43	0.35	0.90	0.80	0.07	1.15	2.11	0.17	0.43	0.42	0.03	1.06
47	48.06	13.65	9.15	1.02	57.21	71.89	0.49	1.13	0.66	0.09	1.15	2.37	0.24	0.55	0.35	0.04	1.18
52	59.36	17.01	10.22	1.28	69.59	87.88	0.47	1.32	0.49	0.10	0.96	2.38	0.23	0.64	0.26	0.05	1.17
57	70.95	20.47	11.23	1.54	82.18	104.19	0.21	1.44	0.31	0.11	0.52	2.07	0.10	0.70	0.16	0.06	1.02
62	84.98	24.61	12.54	1.85	97.52	123.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
67	99.31	28.85	13.80	2.16	113.11	144.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
72	113.72	33.13	15.01	2.48	128.73	164.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
77	128.04	37.40	16.15	2.80	144.18	184.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



## AGRADECIMENTOS

A apresentação deste trabalho tornou-se possível pela colaboração grata de várias personalidades e Instituições. Assim, cabe aqui uma palavra de reconhecimento aos Srs. Presidente do Instituto Politécnico de Bragança, Professor Catedrático Dionísio Gonçalves e ao então Director da Escola Superior Agrária de Bragança, Professor Adjunto Orlando Rodrigues pelas condições proporcionadas para a realização desta dissertação, garantindo também a nossa substituição ao abrigo do programa PRODEP.

À Prof. Catedrática Margarida Tomé do ISA, orientadora desta dissertação, agradecemos profundamente pela ajuda inestimável e, sobretudo, pela contribuição decisiva na definição de metodologias para o tratamento de dados, disponibilidade e sugestões úteis para o desenvolvimento deste trabalho. Agradecemos ainda alguns dos programas que utilizámos.

Ao Prof. Auxiliar José Tomé queremos testemunhar o nosso sincero agradecimento principalmente pela ajuda inestimável na obtenção de alguns programas e esclarecimento de dúvidas estatísticas.

À Prof. Coordenadora Maria do Loreto Monteiro, da ESAB, que embora não sendo co-orientador oficial como inicialmente estava previsto, agradecemos o facto de ter aceite a coordenação do projecto AGRO – 267 com a ajuda do qual se desenvolveu este trabalho. O nosso reconhecimento também pela cedência de dados anteriores das parcelas permanentes, sugestões úteis e apoio que sempre nos dispensou, nomeadamente, numa fase decisiva, ao substituir-nos na docência de 4 horas da disciplina de Silvicultura Geral no 2º semestre de 2004 e revisão do texto.

À Eng<sup>a</sup> Sónia Beito que nos substituiu, no âmbito do programa PRODEP, a nossa gratidão também pela preciosa ajuda na recolha de dados de campo e tratamento de amostras em laboratório.

À Eng<sup>a</sup> Susana Mesquita, que ao desenvolver um estágio profissional no âmbito do projecto AGRO – 267, nos prestou uma ajuda inestimável na recolha de dados de campo e tratamento de amostras em laboratório, o nosso sincero agradecimento.

À Equiparada a Professora Adjunta Ermelinda Pereira, do Departamento de Geociências da ESAB, pela ajuda prestada na análise dos perfis dos solos e pelos esclarecimentos relacionados com o tratamento das respectivas amostras.

Aos laboratórios de solos da ESAB e aos laboratórios de solos e tecnologia da madeira da UTAD, agradecemos a colaboração prestada na análise das amostras efectuadas.

À Eng<sup>a</sup> Técnica Arlete Prazeres e Sr. Novais, da então Zona Florestal de Vila Pouca e ao Eng<sup>o</sup> Técnico Trigo da então Zona Florestal de Amarante, agradece-se os meios colocados à disposição para a realização do trabalho de campo.

Às comissões dos baldios de Bornes de Aguiar (Serra da Padrela) e de Limãos (Serra de Bornes) que de forma empenhada disponibilizaram os respectivos baldios para a elaboração deste estudo bem como a cedência gratuita de árvores, o nosso agradecimento.

À comissão de baldio do povoamento do Marão agradecemos a disponibilidade da área para este estudo.

À DRATM e respectiva DVPF, agradecemos a preciosa colaboração, nomeadamente, disponibilização dos terrenos sob a sua tutela, facultação de meios e cedência gratuita de árvores sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

Às empresas Mata Verde, Bosque Verde e aos proprietários particulares que, de forma empenhada, permitiram a instalação de parcelas permanentes nas suas propriedades, o nosso agradecimento.

Ao Eng<sup>o</sup> Luís Nunes agradecemos a colaboração que nos prestou no âmbito do projecto AGRO 267 na instalação das parcelas permanentes e recolha de dados nas árvores abatidas durante o corte final realizado no povoamento do Vale do Carro, bem como os dados de uma medição da parcela B da Padrela, usados também neste trabalho.

Ao Eng<sup>o</sup> Ricardo Miranda agradecemos a ajuda na marcação e recolha de alguns dados no povoamento do Vale do Carro, no âmbito do relatório de fim de curso aí realizado.

À Eng<sup>a</sup> Blanca Garcia agradecemos a ajuda na instalação das parcelas permanentes e recolha de dados nas árvores abatidas durante o corte final realizado no povoamento do Vale do Carro, no âmbito do relatório de fim de curso.

Aos Eng<sup>os</sup> Maria João Gomes, Fátima Santos e Sílvio Silva agradecemos a ajuda na recolha de dados de campo e tratamento de amostras em laboratório, no âmbito dos seus relatórios de estágio.

Aos Alunos Marco Duarte, Telma Domingues, Frederico Maia, Paulo Andrade, Ana Saraiva, Rita Saraiva, Paulo Santos, Armanda Silva, Sandra Borges, Bárbara Morais e Miguel Teixeira, agradecemos a colaboração na recolha de dados de campo e ou tratamento de amostras em laboratório.

Ao Sr. João Pregal agradecemos a preciosa ajuda no abate das árvores.

Para terminar, queremos expressar a nossa gratidão a todos quantos, directa ou indirectamente, nos prestaram a sua colaboração.

## RESUMO:

Esta dissertação analisa a potencialidade produtiva do castanheiro em regime de alto fuste. Para tal modela-se o crescimento em altura dominante, assim como o crescimento da árvore individual. Uma relação hipsométrica geral e equações de volume total e percentual, assim como uma equação de perfil do tronco complementam o modelo de árvore. Procede-se ainda à modelação da biomassa da árvore, total e por componentes, e da correspondente mineralomassa. É ainda desenvolvida uma tabela de produção provisória para a espécie em Portugal. O crescimento em altura dominante é modelado com base em dados obtidos pelo método de análise do tronco em árvores abatidas e definem-se classes de qualidade pelo método das equações às diferenças. Comparam-se duas estruturas de dados: intervalos sem sobreposição e todos os intervalos possíveis. Utilizam-se técnicas de regressão para seleccionar e ajustar a relação hipsométrica geral, assim como as equações para estimação do volume total e percentual e o modelo para o perfil do tronco. As árvores abatidas foram a base para a determinação do N, P, K, Ca, Mg, S, C e B nos diversos componentes da biomassa aérea, assim como da biomassa da árvore, total e por componentes, dados com os quais se definem sistemas de equações para estimação da biomassa e mineralomassa total e por componentes. Relativamente ao modelo de crescimento da árvore individual opta-se por um modelo de crescimento em diâmetro do tipo função potencial  $\times$  função modificadora. Por último, a tabela de produção provisória para o castanheiro em regime de alto fuste é desenvolvida com base na modelação do volume total.

Palavras-Chave: *Castanea sativa* Mill., Crescimento e produção, Classes de qualidade, Biomassa, Equações de Volume, Modelo de crescimento em diâmetro.

## Analysis of Sweet Chestnut Productivity in Portugal

### ABSTRACT:

This dissertation focus on the analysis of the productivity of sweet chestnut high forest stand in Portugal. Several models were developed for this purpose, namely site index curves and an individual tree dbh growth model. A regional height-dbh curve and a set of total volume, volume ratio as well as stem taper models complement the individual tree model. Modelling of individual tree biomass, total and by tree component, as well as the respective mineralomass was also undertaken. A preliminary yield table for the species in Portugal is also provided. Site index curves were developed based on stem analysis data using the difference equation method. Two structures of data were compared: non-overlapping and the all possible growth intervals. Regression techniques were used to develop the regional height-diameter equation, function of tree diameter, dominant height and other stand specific variables, as well as the system of equations for total and merchantable volume estimation. Harvested trees were also used for the determination of N, P, K, Ca, Mg, S, C e B of the several aboveground tree components as well as for the determination of tree biomass, total and by components. Equations systems for component biomass and nutrient accumulation estimation were fitted simultaneously with seemingly unrelated regression method, being total biomass modelled as the sum of the biomass of the tree components in order to assure the property of additivity among the components of tree. A potential  $x$  modifier approach was adopted for the individual tree dbh growth model. The preliminary yield table for the high forest sweet chestnut was build using the total volume modelling approach.

**Key\_Words:** *Castanea sativa* Mill., Growth and yield, Site index, Biomass, Volume equations, Diameter growth model.

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. APRESENTAÇÃO, JUSTIFICAÇÃO E OBJECTIVOS.....	1
CAPÍTULO I.....	4
A ÁREA DE ESTUDO.....	4
1.1. CARACTERIZAÇÃO DOS LOCAIS DE ESTUDO.....	4
<b>1.1.1. Áreas estudadas.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1.2. Características estacionais gerais.....</b>	<b>5</b>
1.2. METODOLOGIA DE RECOLHA DE DADOS.....	9
CAPÍTULO II.....	15
AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ESTAÇÃO E MODELAÇÃO DO CRESCIMENTO EM ALTURA DOMINANTE.....	15
2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
<b>2.1.1. O conceito de estação florestal.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.2. O índice de qualidade da estação e sua avaliação.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.3. Modelação do crescimento em altura dominante.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.3.1. Atributos desejáveis para as curvas de classe de qualidade.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.3.2. Tipos de dados para ajustamento de curvas de classe de qualidade.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.3.2.1. Quanto à origem dos dados.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.3.2.2. Quanto à estrutura dos dados.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.3.3. Tipos de feixes de curvas.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.3.4. Métodos de construção das curvas de classe de qualidade.....</b>	<b>23</b>
<b>2.1.4. Validação dos modelos de crescimento em altura dominante.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1.4.1. Importância da validação.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1.4.2. Tipos de dados para validação de modelos.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1.4.3. Estatísticas e outros métodos usados na validação.....</b>	<b>27</b>
2.2. METODOLOGIA.....	30
<b>2.2.1. Dados.....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.1.1. Método de análise do tronco.....</b>	<b>33</b>
<b>2.2.2. Ajustamento das funções para predição do crescimento em altura             dominante e índice de qualidade da estação (curvas de classe de qualidade).....</b>	<b>35</b>
<b>2.2.2.1. Selecção de um método de construção das curvas de classe de                 qualidade.....</b>	<b>36</b>
<b>2.2.2.2. Estrutura dos dados.....</b>	<b>37</b>
<b>2.2.2.3. Selecção de um modelo.....</b>	<b>39</b>
<b>2.2.2.4. Estimação dos parâmetros do modelo seleccionado com diferentes                 métodos.....</b>	<b>44</b>
<b>2.2.2.4.1. Estrutura de dados sem sobreposição considerando                     autocorrelação dos erros.....</b>	<b>44</b>
<b>2.2.2.4.2. Estrutura de dados com todos os intervalos possíveis                     considerando autocorrelação dos erros.....</b>	<b>44</b>
<b>2.2.2.5. Selecção do modelo final.....</b>	<b>45</b>
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
<b>2.3.1. Selecção de um modelo.....</b>	<b>45</b>

<b>2.3.1.1. Estimação dos parâmetros do modelo seleccionado com diferentes métodos</b> .....	52
<b>2.3.1.1.1. Comparação e selecção de um modelo final</b> .....	54
<b>2.3.2. Construção das curvas de classe de qualidade</b> .....	59
2.4. CONCLUSÕES.....	61
CAPÍTULO III .....	62
CURVA HIPSOMÉTRICA GERAL PARA O CASTANHEIRO EM REGIME DE ALTO FUSTE .....	62
3.1. RELAÇÕES HIPSOMÉTRICAS GERAIS.....	62
<b>3.1.1. Revisão bibliográfica</b> .....	62
<b>3.1.2. Material e métodos</b> .....	67
<b>3.1.3. Modelos candidatos</b> .....	69
<b>3.1.3.2. Critérios utilizados no ajustamento e selecção de um modelo</b> .....	70
<b>3.1.3.2.1. Avaliação e selecção dos modelos</b> .....	72
<b>3.1.4. Resultados e discussão</b> .....	73
<b>3.1.5. Conclusões</b> .....	79
CAPÍTULO IV .....	81
ESTIMAÇÃO DO VOLUME TOTAL, DO VOLUME PERCENTUAL E MODELAÇÃO DO PERFIL DO TRONCO .....	81
4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	81
4.2. METODOLOGIA .....	87
<b>4.2.1. Dados</b> .....	87
<b>4.2.2. Caracterização dos conjuntos de dados</b> .....	89
<b>4.2.3. Modelos candidatos</b> .....	90
<b>4.2.4. Critérios utilizados no ajustamento e selecção dos modelos de cada tipo</b> .....	93
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	95
<b>4.3.1. Equações de volume total</b> .....	95
<b>4.3.2. Equações de volume percentual</b> .....	104
<b>4.3.3. Equações de perfil do tronco</b> .....	113
4.4. CONCLUSÕES .....	117
CAPÍTULO V .....	120
ESTIMAÇÃO DA BIOMASSA E MINERALOMASSA AÉREA.....	120
5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	120
<b>5.1.1. Métodos de avaliação da biomassa</b> .....	122
5.2. MATERIAL E MÉTODOS .....	124
<b>5.2.1. Medição das árvores seleccionadas para abate</b> .....	125
<b>5.2.2. Tratamento das amostras em laboratório</b> .....	126
<b>5.2.3. Caracterização dos dados finais</b> .....	128
<b>5.2.4. Modelos testados e organização dos dados</b> .....	130
<b>5.2.4.1. Equações de biomassa</b> .....	130
<b>5.2.4.2. Equações de mineralomassa</b> .....	131

<b>5.2.5. Critérios utilizados no ajustamento e selecção dos modelos.....</b>	<b>131</b>
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	135
<b>5.3.1. Equações de biomassa .....</b>	<b>135</b>
<b>5.3.1.1. Equações de biomassa percentual para o tronco principal .....</b>	<b>143</b>
<b>5.3.2. Equações de mineralomassa .....</b>	<b>147</b>
<b>5.3.3. Biomassa e mineralomassa aérea dos povoamentos.....</b>	<b>152</b>
5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	159
CAPÍTULO VI.....	162
MODELAÇÃO DO CRESCIMENTO EM DIÂMETRO DA ÁRVORE INDIVIDUAL	
.....	162
6.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	162
<b>6.1.1. Modelos de árvore individual.....</b>	<b>162</b>
<b>6.1.1.1. Classificação dos modelos .....</b>	<b>164</b>
<b>6.1.1.2. Modelação do acréscimo em diâmetro .....</b>	<b>166</b>
6.2. MATERIAL E MÉTODOS .....	168
<b>6.2.1. Modelos e metodologias testadas.....</b>	<b>169</b>
<b>6.2.1.1. Função potencial.....</b>	<b>170</b>
<b>6.2.1.2. Função modificadora.....</b>	<b>170</b>
<b>6.2.2. Critérios utilizados no ajustamento e selecção dos modelos.....</b>	<b>172</b>
6.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	173
<b>6.4.1. Função potencial.....</b>	<b>173</b>
<b>6.4.2. Função modificadora.....</b>	<b>179</b>
6.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	183
CAPÍTULO VII.....	184
TABELAS DE PRODUÇÃO PROVISÓRIAS PARA O CASTANHEIRO EM	
REGIME DE ALTO FUSTE.....	184
7.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	184
7.2. ELABORAÇÃO DA TABELA DE PRODUÇÃO .....	188
<b>7.2.1. Equação de predição para o diâmetro quadrático médio.....</b>	<b>188</b>
<b>7.2.2. Modelação da linha de mortalidade natural .....</b>	<b>189</b>
<b>7.2.3. Equação de predição para o volume total do povoamento .....</b>	<b>191</b>
<b>7.2.4. Implementação da tabela de produção provisória para o castanheiro</b>	
<b>.....</b>	<b>197</b>
7.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	204
8. CONCLUSÕES .....	206
BIBLIOGRAFIA .....	210
ANEXOS .....	235
ANEXO I.....	236
ANEXO II.....	245
ANEXO III .....	247

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1: Características das parcelas permanentes instaladas em povoamentos jovens de castanheiro em regime de alto fuste.....	10
Quadro 1.2: Caracterização dendrométrica das parcelas.....	14
Quadro 2.1: Exemplificação com uma árvore das estruturas de dados que se podem utilizar na elaboração de curvas de classe de qualidade.....	22
Quadro 2.2: Características dos dados disponíveis para a modelação da altura dominante e construção das curvas de classes de qualidade.....	33
Quadro 2.3: Características dos dados usados para a modelação da altura dominante e construção das curvas de classes de qualidade, com observações trienais.....	37
Quadro 2.4: Funções de crescimento testadas e respectivas equações às diferenças.....	39
Quadro 2.5: Valores das estimativas dos parâmetros, estatísticas de ajustamento, precisão e enviesamento dos modelos apresentados no ponto 2.2.2.3., após ponderação pela função influência de <i>Huder</i> e $h_{dom_1}$ .....	46
Quadro 2.6: Resultados do ajustamento do modelo <i>MA</i> a diferentes estruturas de dados, considerando a autocorrelação dos erros.....	52
Quadro 3.1: Funções de aplicação local que melhor descreveram a relação altura-diâmetro para o castanheiro.....	65
Quadro 3.2: Funções vulgarmente utilizadas na modelação de relações hipsométricas gerais.....	66
Quadro 3.3: Caracterização dos dois subconjuntos de dados de ajustamento e validação usados para a modelação de relações hipsométricas gerais.....	68
Quadro 3.4: Equações altura-diâmetro utilizadas como modelos candidatos na modelação das curvas hipsométricas gerais para o castanheiro.....	70
Quadro 3.5: Resultados da avaliação do ajustamento e predição dos modelos com os dois subconjuntos de dados.....	74
Quadro 3.6: Medidas de predição resultantes do processo de validação cruzada para as equações com melhor desempenho.....	75
Quadro 3.7: Estatísticas de ajustamento e predição dos modelos com melhor desempenho para a curva hipsométrica geral, após ponderação (função influência de <i>Huder</i> e $1/h_{dom}$ ), para a totalidade dos dados.....	77
Quadro 3.8: Média dos resíduos de predição e média do valor absoluto dos resíduos de predição, por classes de idade, densidade e classe de qualidade, para a totalidade dos dados.....	79
Quadro 4.1: Caracterização dendrométrica do conjunto de dados <i>1</i> a utilizar no ajustamento das equações de volume total, percentual e perfil do tronco (volumes obtidos por cubagem rigorosa com telerelascópio).....	89
Quadro 4.2: Caracterização dendrométrica dos conjuntos de dados <i>2</i> e <i>3</i> provenientes das árvores abatidas para análise do tronco e do corte final efectuado no povoamento <i>C</i> da Padrela.....	90
Quadro 4.3: Modelos pré-candidatos para o desenvolvimento de equações de volume total de dupla entrada.....	91
Quadro 4.4: Modelos testados para o desenvolvimento de equações de volume percentual em função de um diâmetro de despona ou altura de despona.....	91
Quadro 4.5: Equações testadas para a modelação do perfil do tronco.....	92
Quadro 4.6: Medidas de ajustamento e capacidade preditiva dos modelos de volume total sobre casca, após ponderação pela função de Huber e $1/d^2h$ (fase de ajustamento).....	96
Quadro 4.7: Medidas de capacidade preditiva resultantes do processo de validação para as equações de volume total com casca.....	97

Quadro 4.8: Ordenação dos modelos de volume total com casca na fase de validação.	97
Quadro 4.9: Média dos resíduos de predição e média do valor absoluto dos resíduos de predição, por classes de diâmetro $d$ e altura $h$ , para as equações de volume total com casca.	99
Quadro 4.10: Medidas de ajustamento e capacidade preditiva dos modelos de volume comercial sem casca, usando o diâmetro também sem casca, após ponderação (função influência de Huber e $d_{sc^2h_m}$ ).	102
Quadro 4.11: Média dos resíduos de predição e média do valor absoluto dos resíduos de predição, por classes de diâmetro $d$ e altura mercantil $hm$ , para as equações de volume comercial sem casca.	103
Quadro 4.12: Medidas de ajustamento e predição dos modelos de volume percentual sobre casca em função de uma altura de despona, após <i>IRWLS</i> (fase de ajustamento).	104
Quadro 4.13: Medidas da capacidade preditiva resultantes do processo de validação para as equações de volume percentual com casca em função da altura de despona (fase de validação).	105
Quadro 4.14: Média dos resíduos de predição e média do valor absoluto dos resíduos de predição, por classes de altura de despona $hi$ , para as equações de volume percentual com casca em função de $hi$ (fase de validação).	106
Quadro 4.15: Medidas de ajustamento e predição dos modelos de volume percentual sobre casca em função de um diâmetro de despona, após <i>IRWLS</i> (fase de ajustamento).	108
Quadro 4.16: Medidas de predição resultantes do processo de validação para as equações de volume percentual com casca em função do diâmetro de despona (fase de validação).	108
Quadro 4.17: Média dos resíduos de predição e média do valor absoluto dos resíduos de predição, por classes de diâmetro de despona $di$ , para as equações de volume percentual com casca em função de $di$ .	109
Quadro 4.18: Medidas de ajustamento e predição dos modelos de volume percentual sob casca em função de uma altura de despona, após <i>IRWLS</i> .	110
Quadro 4.19: Média dos resíduos <i>mPRESS</i> e <i>maPRESS</i> , por classes de altura de despona $hi$ , para as equações de volume percentual sem casca em função de $hi$ .	111
Quadro 4.20: Medidas de ajustamento e predição dos modelos de volume percentual sob casca em função de um diâmetro de despona, após <i>IRWLS</i> .	112
Quadro 4.21: Média dos resíduos <i>mPRESS</i> e <i>maPRESS</i> , por classes de diâmetro de despona $di$ , para as equações de volume percentual sem casca em função de $di$ .	113
Quadro 4.22: Medidas de ajustamento e predição das equações de perfil do tronco sobre casca, após <i>IRWLS</i> (fase de ajustamento, $n=4152$ ).	114
Quadro 4.23: Medidas de predição resultantes do processo de validação para as equações de perfil do tronco com casca (fase de validação, $n = 369$ ).	115
Quadro 4.24: Média dos resíduos e média do valor absoluto dos resíduos de predição para a estimativa dos diâmetros do tronco com casca a diferentes alturas $hi$ .	116
Quadro 5.1: Distribuição das árvores abatidas por classe de diâmetro e local.	124
Quadro 5.2: Caracterização do conjunto de dados utilizados na modelação da biomassa (W) em função de variáveis dendrométricas das 34 árvores abatidas.	128
Quadro 5.3: Valores médios e respectivos desvios padrões (valor apresentado entre parêntesis), da concentração de elementos minerais por componentes e subcomponentes da biomassa considerados.	129
Quadro 5.4: Valor médio e respectivo desvio padrão (entre parêntesis) da mineralomassa, para cada um dos elementos minerais considerados.	130

Quadro 5.5: Estatísticas de ajustamento e predição dos modelos com melhor desempenho para a biomassa por componentes, após ponderação (Huber + factores de ponderação).....	136
Quadro 5.6: Comparação dos modelos ajustados separadamente e em simultâneo, com base no erro padrão dos coeficientes e eficiência de modelação, após ponderação. ....	139
Quadro 5.7: Média dos resíduos e media dos valores absolutos dos resíduos, por classes de diâmetro e altura, para os submodelos dos diferentes componentes da biomassa ajustados simultaneamente (resíduos ordinários ponderados). ....	142
Quadro 5.8: Estatísticas de ajustamento e predição dos modelos com melhor desempenho para a biomassa percentual do tronco, em função de um diâmetro de desponta e de uma altura de desponta, após <i>IRWLS</i> .....	143
Quadro 5.9: Estatísticas de ajustamento e predição dos modelos com melhor desempenho para a mineralomassa por componentes e por elemento, após ponderação (Huber + factores de ponderação). ....	148
Quadro 5.9: (continuação). Estatísticas de ajustamento e predição dos modelos com melhor desempenho para a mineralomassa por componentes e por elemento, após ponderação (Huber + factores de ponderação). ....	149
Quadro 5.10: Biomassa aérea, total e por componentes, dos povoamentos estudados.	152
Quadro 5.11: Mineralomassa aérea, total e por componentes, dos povoamentos estudados obtida através das equações compatíveis de mineralomassa e biomassa. ....	154
Quadro 5.11 (continuação): Mineralomassa aérea, total e por componentes, dos povoamentos estudados obtida através das equações compatíveis de mineralomassa e biomassa. ....	155
Quadro 6.1: Características dos dados usados na modelação do crescimento em diâmetro das dominantes, com casca, com a idade (função potencial). ....	169
Quadro 6.2: Estatísticas de ajustamento e predição dos modelos utilizados na modelação do crescimento em diâmetro das árvores dominantes. ....	174
Quadro 6.3: Valores dos parâmetros e estatísticas de ajustamento dos modelos previamente seleccionados, após ponderação pela função de Huber e $1/\sqrt{ddom1}$ , e reajustamento em função do índice de classe de qualidade.....	175
Quadro 6.4: Estatísticas de ajustamento e predição das funções de crescimento em diâmetro potencial seleccionadas. Valor mínimo e máximo da assíptota estimado com os índices de qualidade da estação 14 e 26.....	176
Quadro 6.5: Média dos resíduos de predição <i>mPRESS</i> e média dos resíduos de predição em valor absoluto <i>maPRESS</i> , por classes de idade e qualidade, dos modelos de crescimento em diâmetro <i>CR2</i> e <i>CR3</i> .....	177
Quadro 6.6: Modelos de crescimento em diâmetro e em área seccional independentes da distância, com todas as variáveis significativas.....	180
Quadro 6.7: Matriz de correlação para as variáveis/ índices de competição utilizados. ....	180
Quadro 6.8: Estatísticas de ajustamento e predição do modelo de crescimento em diâmetro e valor máximo e mínimo assumidos pela função modificadora, após ponderação ( <i>IRWLS</i> ).....	181
Quadro 6.9: Média dos resíduos de predição <i>mPRESS</i> e média dos resíduos de predição em valor absoluto <i>maPRESS</i> , por classes de idade, qualidade e densidade, do modelo de crescimento em diâmetro seleccionado. ....	182

Quadro 7.1: Estatísticas de ajustamento, precisão e enviesamento dos modelos de predição para o diâmetro quadrático médio, após ponderação pela função influência de <i>Huber</i> com $r=1$ e $1/h_{dom}$ . .....	189
Quadro 7.2: Modelo para condução numa plantação de castanheiro em regime de alto fuste em povoamento florestal.....	200

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Distribuição do castanheiro em Portugal (Fonte: Inventário Florestal Nacional, 2001) e localização dos povoamentos em estudo. ....	4
Figura 1.2: Aspecto geral de dois povoamentos jovens localizados em Chãos e Moredó onde foram instaladas as parcelas assinaladas (posição aproximada). ....	9
Figura 1.3: Levantamento perimetral dos povoamentos de Bornes e Padrela (Vale do Carro) com <i>GPS</i> e aspecto geral dos mesmos. ....	12
Figura 1.4: Levantamento perimetral do povoamento do Marão com <i>GPS</i> e aspecto geral dos mesmos no decorrer do abate das árvores. ....	12
Figura 2.1: Distribuição das árvores no povoamento <i>C</i> da Padrela (Vale do Carro). ....	31
Figura 2.2: Desenvolvimento da altura com a idade das árvores dominantes abatidas..	32
Figura 2.3 : Gráficos em papel de probabilidades normal para os resíduos studentizados obtidos com o modelo McDill-Amateis, com intervalos sem sobreposição, antes ( <i>RSTUD</i> ) e depois ( <i>RSTUD1</i> ) da ponderação efectuada (função influência de <i>Huder</i> e <i>hdom<sub>1</sub></i> ). ....	49
Figura 2.4: Histograma dos resíduos studentizados com aproximação à normal após ponderação (função influência de <i>Huder</i> e <i>hdom<sub>1</sub></i> ). ....	49
Figura 2.5: Gráfico dos resíduos studentizados vs. altura dominante estimada, para o modelo McDill-Amateis, com intervalos de crescimento sem sobreposição, após ponderação (função influência de <i>Huder</i> e <i>hdom<sub>1</sub></i> ). ....	49
Figura 2.6: Erro médio <i>a</i> ) e erro médio em valor absoluto <i>b</i> ), por classes de idade e de <i>SI</i> , da predição do crescimento em altura dominante com o modelo <i>MA</i> , linha (—), e respectivo desvio padrão, linha (---), com intervalos sem sobreposição, após ponderação (função influência de <i>Huder</i> e <i>hdom<sub>1</sub></i> ). ....	50
Figura 2.7: Erro médio <i>a</i> ) e erro médio em valor absoluto <i>b</i> ), para as estimativas de <i>SI<sub>45</sub></i> , por classes de idade e de <i>SI</i> , linha (—), e desvio padrão, linha (---), utilizando o mesmo modelo ( <i>MA</i> ) para a determinação do <i>SI</i> , com intervalos sem sobreposição. ....	51
Figura 2.8: Comparação dos resíduos ordinários vs. valores preditos obtidos com o modelo <i>MA</i> ajustado com uma estrutura de dados com intervalos sem sobreposição, antes e depois da expansão do termo do erro. ....	53
Figura 2.9: Comparação dos resíduos ordinários vs. valores preditos obtidos com o modelo <i>MA</i> ajustado com uma estrutura de dados com todos os intervalos possíveis, antes e depois da expansão do termo do erro. ....	53
Figura 2.10: Comparação da relação entre os resíduos resultantes da predição de <i>h<sub>i-1</sub></i> a partir de <i>h<sub>j</sub></i> e <i>h<sub>i</sub></i> a partir de <i>h<sub>j-1</sub></i> , antes <i>a</i> ) e depois <i>b</i> ), da expansão do termo do erro. ....	54
Figura 2.11: Erro médio <i>a</i> ) e erro médio em valor absoluto <i>b</i> ), da predição de <i>hdom</i> , por intervalo de projecção para o modelo <i>MA</i> ajustado com diferentes métodos: <i>MA_0</i> , linha (—x—), <i>MA_1</i> , linha (—) e <i>MA_2</i> , linha (—◇—). ....	54
Figura 2.12: Erro médio <i>a</i> ) e erro médio em valor absoluto <i>b</i> ) da predição de <i>hdom</i> com um ficheiro de validação com todos os intervalos possíveis, por classes de idade e de <i>SI</i> , para o modelo <i>MA</i> ajustado com diferentes métodos: <i>MA_0</i> , linha (—x—), <i>MA_1</i> , linha (—) e <i>MA_2</i> , linha (—◇—). ....	56
Figura 2.13: Erro médio <i>a</i> ) e erro médio em valor absoluto <i>b</i> ), da predição de <i>SI<sub>45</sub></i> , por intervalo de projecção para o modelo <i>MA</i> ajustado com diferentes métodos: <i>MA_0</i> , linha (—x—), <i>MA_1</i> , linha (—) e <i>MA_2</i> , linha (—◇—). ....	56
Figura 2.14: Erro médio <i>a</i> ) e erro médio em valor absoluto <i>b</i> ) da predição de <i>SI<sub>45</sub></i> com um ficheiro de validação com todos os intervalos possíveis, por classes de idade e	

de <i>SI</i> , para o modelo <i>MA</i> ajustado com diferentes métodos: <i>MA_0</i> , linha (—x—), <i>MA_1</i> , linha (—) e <i>MA_2</i> , linha (—◇—).....	57
Figura 2.15: Erro médio <i>a</i> ) e erro médio em valor absoluto <i>b</i> ) da predição de <i>h<sub>dom</sub></i> com um ficheiro de validação com intervalos sem sobreposição, por classes de idade e de <i>SI</i> , para o modelo <i>MA</i> ajustado com diferentes métodos: <i>MA_0</i> , linha (—x—), <i>MA_1</i> , linha (—) e <i>MA_2</i> , linha (—◇—).....	58
Figura 2.16: Erro médio <i>a</i> ) e erro médio em valor absoluto <i>b</i> ) da predição de <i>SI<sub>45</sub></i> com um ficheiro de validação com intervalos sem sobreposição, por classes de idade e de <i>SI</i> , para o modelo <i>MA</i> ajustado com diferentes métodos: <i>MA_0</i> , linha (—x—), <i>MA_1</i> , linha (—) e <i>MA_2</i> , linha (—◇—).....	58
Figura 2.17: Curvas de classe de qualidade sobrepostas com as curvas de crescimento em altura dominante das árvores abatidas usadas para a sua construção. ....	60
Figura 2.18: Curvas de classe de qualidade para o castanheiro em regime de alto fuste. .....	60
Figura 3.1: Diagramas de extremos e quartis, da altura <i>h</i> ( <i>m</i> ) observada por classe de diâmetro <i>d</i> ( <i>cm</i> ), para os subconjuntos de dados 1 e 2, designados por <i>a</i> ) e <i>b</i> ), respectivamente. ....	69
Figura 3.2: Histograma dos resíduos studentizados do modelo Prodan modificado, após ponderação (função <i>Huder</i> e $1/h_{dom}$ ), para a totalidade dos dados. ....	75
Figura 3.3: Gráficos dos resíduos studentizados em papel de probabilidades normal obtidos com o modelo Prodan modificado, antes ( <i>RSTUD</i> ) e depois ( <i>RSTUDI</i> ) da ponderação efectuada (função influência de <i>Huder</i> e $1/h_{dom}$ ), para a totalidade dos dados. ....	76
Figura 3.4: Gráfico dos resíduos studentizados vs. altura estimada, para o modelo Prodan modificado, após ponderação (função influência de <i>Huder</i> e $1/h_{dom}$ ), para a totalidade dos dados. ....	76
Figura 4.1: Volume estimado em função do volume observado, para os três modelos melhor classificados (EVT6, EVT2 e EVT7). ....	101
Figura 5.1: Resíduos vs. valores estimados dos modelos seleccionados para estimar a biomassa dos seguintes componentes, após ponderação (função de Huber + factores de ponderação): <i>W_casc</i> , <i>W_Rviv</i> , <i>W_Ftot</i> , <i>W_Lenho</i> , <i>W_Tronc</i> e <i>W_Tot</i> (leitura da esquerda para a direita e de cima para baixo). ....	137
Figura 5.2: Gráficos em papel de probabilidade normal para os modelos seleccionados para a biomassa dos seguintes componentes, após ponderação (função de Huber + factores de ponderação): <i>W_casc</i> , <i>W_Rviv</i> , <i>W_Ftot</i> , <i>W_Lenho</i> , <i>W_Tronc</i> e <i>W_Tot</i> , (leitura da esquerda para a direita e de cima para baixo). ....	138
Figura 5.3: Resíduos ponderados vs. valores estimados para as componentes da biomassa ajustadas pelo processo <i>ITSUR</i> com ponderação. ....	140
Figura 5.4: Resíduos ponderados em função dos valores estimados para a biomassa total da árvore, obtida através da aditividade das biomassa parciais pelo processo <i>ITSUR</i> . ....	141
Figura 5.5: Gráficos dos resíduos studentizados vs. valores estimados e em papel de probabilidades normal dos modelos seleccionados para a biomassa percentual em função do diâmetro de despona <i>di</i> com casca <i>a</i> ) e altura de despona <i>hi</i> <i>b</i> ), após ponderação ( <i>IRWLS</i> ). ....	144
Figura 5.6: Diagrama de extremos e quartis dos resíduos <i>PRESS</i> e respectivos valores absolutos ( <i>aPRESS</i> ) dos modelos percentuais da biomassa do tronco sobre casca <i>a</i> ) e sob casca <i>b</i> ), para um diâmetro de despona. ....	146

Figura 5.7: Diagrama de extremos e quartis dos resíduos <i>PRESS a)</i> e respectivos valores absolutos ( <i>aPRESS b)</i> dos modelos percentuais da biomassa do tronco com casca para uma altura de despona. ....	147
Figura 5.8: Concentração média dos elementos <i>N, P e K</i> por categorias de biomassa consideradas e por classe de diâmetro. ....	156
Figura 5.9: Concentração média do cálcio por categorias de biomassa consideradas e por classe de diâmetro. ....	157
Figura 5.10: Concentração média do magnésio por categorias de biomassa consideradas e por classes de diâmetro. ....	157
Figura 5.11: Concentração média de boro por categorias de biomassa consideradas e por classes de diâmetro. ....	158
Figura 5.12: Concentração média de enxofre por categorias de biomassa consideradas e por classes de diâmetro. ....	158
Figura 5.13: Concentração média de carbono por categorias de biomassa consideradas e por classes de diâmetro. ....	159
Figura 6.1: Gráfico dos resíduos studentizados vs. diâmetro dominante estimado, para os modelos <i>CR2 - a)</i> e <i>CR3 - b)</i> , após ponderação pela função de Huber e $1/\sqrt{ddom1}$ . ....	176
Figura 6.2: Gráficos em papel de probabilidades normal para os resíduos studentizados obtidos com os modelos <i>CR2 - a)</i> e <i>CR3 - b)</i> , após ponderação pela função de Huber e $1/\sqrt{ddom1}$ . ....	177
Figura 7.1: Relação entre o logaritmo do número de árvores por hectare <i>N</i> em função do logaritmo do diâmetro médio <i>dg</i> , para os dados disponíveis. ....	190
Figura 7.2: Dados das parcelas de castanheiro para a modelação da relação volume total em função da altura dominante. ....	191
Figura 7.3: Comparação do volume total em função da altura dominante das parcelas de castanheiro nacionais com a faia e castanheiro em Inglaterra. ....	193
Figura 7.4: Comparação do volume total estimado para o castanheiro com a equação (3) com o volume total estimado pelas tabelas de produção inglesas (faia e castanheiro). ....	194
Figura 7.5: Comparação das curvas de volume total obtidas com as equações (1), pontos, e (2), <i>a cheio</i> , em termos da sua adequação ao crescimento biológico. ...	196
Figura 7.6: Comparação das curvas de volume total obtidas com as equações (3), linha e (4), linha $\bar{\quad}$ , em termos da sua adequação ao crescimento biológico. ....	197
Figura 7.7: Comparação das classes de qualidade definidas para o castanheiro em Portugal com as classes de produtividade das tabelas de produção inglesas (faia e castanheiro). ....	198
Figura 7.8: Tabela de produção para o castanheiro em regime de alto fuste com uma silvicultura baseada no modelo de condução proposto por Bourgeois <i>et al.</i> (2004). ....	201
Figura 7.9: Visualização gráfica correspondente à silvicultura definida na tabela de produção baseada no modelo de condução proposto por Bourgeois <i>et al.</i> (2004). ....	202
Figura 7.10: Estimativa da biomassa produzida e carbono armazenado ( $Mg\ ha^{-1}$ ), correspondente à silvicultura definida na tabela de produção baseada no modelo de condução proposto por Bourgeois <i>et al.</i> (2004). ....	203
Figura 7.11: Visualização da biomassa e carbono acumulados, correspondente à silvicultura definida na tabela de produção baseada no modelo de condução proposto por Bourgeois <i>et al.</i> (2004), para o povoamento principal. ....	203

Figura 7.12: Estimativa da quantidade de *N*, *P*, *K*, *Ca*, *Mg*, *S* e *B* acumulados, correspondente à silvicultura definida na tabela de produção baseada no modelo de condução proposto por Bourgeois *et al.* (2004), para o povoamento principal.... 204

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo/ sigla	Descrição	Unidades
_cc	- sub índice que significa com casca	
_sc	- sub índice que significa sem casca	
ac	- acréscimo corrente em volume total	$m^3ha^{-1}ano^{-1}$
ama	- acréscimo médio anual em volume total	$m^3ha^{-1}ano^{-1}$
BAL	- área basal das árvores com diâmetro superior ao da árvore considerada	$m^2ha^{-1}$
C(p)	- estatística Cp Mallows	
d	- diâmetro altura do peito (1,30 m)	cm
d_bc	- diâmetro na base da copa viva	cm
d <sub>dom</sub>	- diâmetro médio das dominantes	cm
d <sub>dom1</sub>	- diâmetro médio das dominantes na idade $t_1$	cm
d <sub>dom2</sub>	- diâmetro médio das dominantes na idade $t_2$	cm
dg	- diâmetro quadrático médio	cm
DGRF	- Direcção Geral das Florestas	
di	- diâmetro de desponta	cm
dmáx	- diâmetro máximo a 1,30 m	
dmín	- diâmetro mínimo a 1,30 m	
DGRF	- Direcção Geral de Recursos Florestais	
DRATM	- Direcção Regional de Agricultura de Trás-os-Montes	
DSPE	- Direcção de Serviços de Planeamento e Estatística da DGRF	
DSVPF	- Direcção de Serviços de Valorização do Património Florestal da DGRF	
DVPF	- Divisão de Valorização do Património Florestal (DRATM)	
EM	- eficiência de modelação, equivalente ao coef. de determinação da regressão linear.	
G	- área basal por hectare	$m^2ha^{-1}$
g	- área seccional individual a 1,30 m de altura	$cm^2$
gm	- área seccional média a 1,30 m de altura	$cm^2$
GNLS	- método dos mínimos quadrados não lineares generalizados " <i>generalised nonlinear least squares</i> "	
h	- altura total da árvore	m
h_bc	- altura até ao início da copa viva	m
h <sub>dom</sub>	- altura dominante	m
h <sub>dom1</sub>	- altura dominante na idade $t_1$	m
h <sub>dom2</sub>	- altura dominante na idade $t_2$	m
hg	- altura da árvore de área basal média	m
hi	- altura de desponta	m
hm	- altura mercantil	m
hmáx	- altura total máxima	m
hmed	- altura média do povoamento principal	m
hmín	- altura total mínima	m
idm	- acréscimo médio anual em diâmetro	$cm\ ano^{-1}$
igm	- acréscimo médio anual em área seccional	$cm\ ano^{-1}$
invG	- inverso de G	$m^2ha^{-1}$
invN	- inverso de N	
IRWLS	- método de regressão dos mínimos quadrados ponderados iterativamente " <i>Iteratively reweighted least squares</i> "	
maPRESS	- média absoluta dos resíduos PRESS de predição	

Símbolo/ sigla	Descrição	Unidades
marp	- média absoluta dos resíduos de predição	
mPRESS	- média dos resíduos PRESS de predição	
mrp	- média dos resíduos de predição	
N	- número de árvores por hectare	
n	- número de observações	
n.s.	- não significativo $P > 5 \%$	
NCOND	- número de condição da matriz de correlação entre as variáveis explanatórias $X^* 'X^*$ para os modelos lineares, sendo $X^*$ a matriz dos dados centrada e escalada. No caso dos modelos não lineares refere-se à matriz $W'W$ , sendo $W$ a matriz das derivadas parciais em ordem a cada um dos parâmetros calculada para a solução).	
Ns	- número de árvores saídas em desbaste	
SUR	- método das regressões aparentemente não relacionadas “nonlinear seemingly unrelated regressions”	
OLS	- método de regressão dos mínimos quadrados ordinários “ordinary least squares”	
P99; P95; P5; P1	- percentís, 99 %, 95 %, 5 % e 1 %, respectivamente.	
PRESS	- estatística PRESS	
QMR	- quadrado médio dos resíduos	
QMrp	- quadrado médio dos resíduos de predição	
r	- factor limite da função influência de Huber	
R	- percentagem do volume total	
$R^2$	- coeficiente de determinação	
$R^2_{ajust}$	- coeficiente de determinação ajustado	
$R^2_{pred}$	- $R^2$ de predição	
$R^2_{rp}$	- $R^2$ dos resíduos de predição	
Rbm	- razão entre g e gm	
Rd	- razão entre d e ddom	
Rdm	- razão entre d e dg	
rp	- resíduos de predição	
RSTUD	- resíduos studentizados sem ponderação	
RSTUD1	- resíduos studentizados após ponderação	
s	- desvio padrão	
SI	- índice de classe de qualidade definido para uma idade padrão de 45 anos ( $SI_{45}$ )	m
SQR	- soma de quadrados dos resíduos	
t	- idade	anos
$t_1$	- idade no momento 1	anos
$t_2$	- idade no momento 2	anos
ui	- pontos de junção	
V	- volume do povoamento	$m^3$
v	- volume total da árvore	$m^3$
VIF	- factor de inflação da variância	
vm	- volume mercantil	$m^3$
Vp	- volume do povoamento principal	$m^3 \text{ ha}^{-1}$
Vrp	- variância dos resíduos de predição	
Vs	- volume saído em desbaste	$m^3 \text{ ha}^{-1}$
Vs_acum	- volume saído em desbaste acumulado	$m^3 \text{ ha}^{-1}$

Símbolo/ sigla	Descrição	Unidades
Vtot	- volume total do povoamento	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>
W_Casc	- biomassa da casca	
W_Flor	- biomassa das flores masculinas e femininas	
W_Folh	- biomassa das folhas	
W_lenho	- biomassa do tronco principal sob casca	
W_Rmort	- biomassa dos ramos mortos	
W_Rtot	- biomassa dos ramos totais	
W_Rviv	- biomassa dos ramos vivos	
W_Tot	- biomassa total	
β <sub>i</sub>	- coeficientes da regressão	