

Medição de Parâmetros Dendrométricos através de Fotografia Aérea Estereoscópica

¹J.P. Castro, ²L.M. Martins, ²F.W. Macedo e ²J.T. Aranha

¹Escola Superior Agrária de Bragança, Apartado 1172, 5301-855 BRAGANÇA

²Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Apartado 1013, 5001-911 VILA REAL

Resumo: A estimativa da altura dominante média de árvores (*Pinus pinaster*) foi efectuada em 37 parcelas circulares de 500 m² através de 3 métodos de medição: (1) medição directa no campo com um hipsómetro de Blume Leiss (hd); (2) medição com barra de paralaxe sobre pares estereoscópicos analógicos (hPRX); (3) com sistema CAD (hCAD) sobre pares estereoscópicos de imagens digitais ou de fotos digitalizadas. Através dum teste *t* de Student avaliou-se a significância das diferenças entre hd e hCAD (P= 0.4436) e entre hd e hPRX (P= 0.2420), concluindo-se não serem estatisticamente diferentes. Concluiu-se também não haver diferenças significativas entre hd e hCAD para várias espécies e locais diferentes, com base em medições efectuadas em 105 parcelas de 500 m²: Bétula no Marão-Campeã (P= 0.3847); Pinheiro negral no Marão-Campeã (P= 0.7729); Eucalipto em Amarante-Aboim (P= 0.9704), Pinheiro bravo em Vidago-Boticas- (P= 0.7615). Os métodos propostos e aplicados permitem assim abrir perspectivas de utilização futura no Inventário Florestal de povoamentos correctamente ordenados, dadas as suas vantagens económicas e temporais.

Palavras chave: fotografia aérea de pequeno formato, paralaxe estereoscópica, navegação com GPS, inventário florestal, altura dominante média.

Introdução

A partir de pares de fotografias aéreas verticais com sobreposição estereoscópica é possível realizar a medição de características físicas de povoamentos florestais (por ex.: a altura total, diâmetro de copa, densidade de copas, etc.), que por sua vez se podem relacionar com outras características do povoamento (por ex.: volume de madeira em pé por hectare) ou serem usadas simplesmente para caracterizar qualitativamente um povoamento florestal. (Avery e Burkhart, 1994, [http 1]).

Para medições com rigor aceitável são necessárias fotografias aéreas com sobreposição estereoscópica de cerca de 60% e com escalas superiores a 1:10 000 (Castro, 2004; Castro *et al*, 2004, Lillesand e Kiefer, 1987). Como as fotografias comercialmente disponíveis apresentam escalas muito inferiores (1:40 000) e estão bastante desactualizadas (coberturas de 1995 e 2000), elas são inúteis para medições dendrométricas. É no entanto possível obter fotografia aérea de pequeno e médio formato (FAPMF) com características adequadas para essas medições (Castro *et al*, 2004, Castro, 2004, Martins, 2004).

Objectivos

Com o presente trabalho pretendeu-se avaliar a possibilidade de medição da altura total de árvores através de FAPMF, captadas especialmente para esse efeito. A medição incidiu sobre as 5 árvores mais altas (dominantes) que se conseguiram evidenciar em torno do centro de parcelas circulares de 500m² estabelecidas no terreno e identificadas em cada FAPMF.

Testaram-se duas formas de medição das alturas, ambas baseadas na diferença de paralaxe entre duas fotografias consecutivas numa mesma linha de voo (fiada) com cerca de

60% de sobreposição longitudinal, devidamente aferidas com medições no terreno por inventário convencional.

O objectivo fundamental deste estudo foi o desenvolvimento de técnicas alternativas de Inventário Florestal associadas à Detecção Remota como forma de estimativa rápida, expedita e económica de um dos parâmetros dendrométricos mais importantes dos povoamentos florestais, a altura dominante média (hd).

Uma das utilizações possíveis desta técnica é a caracterização qualitativa de povoamentos florestais, embora também seja possível a criação de tabelas de volume aéreas locais.

Área de Estudo

Este trabalho incidiu sobre 3 áreas de estudo situadas no Norte de Portugal, nas províncias de Trás-os-Montes e Alto Douro e Douro Litoral (Figuras 1 e 2):

- Amarante – Aboim
- Marão - Vale da Campeã
- Vale do Alto Tâmega – Vidago/Boticas

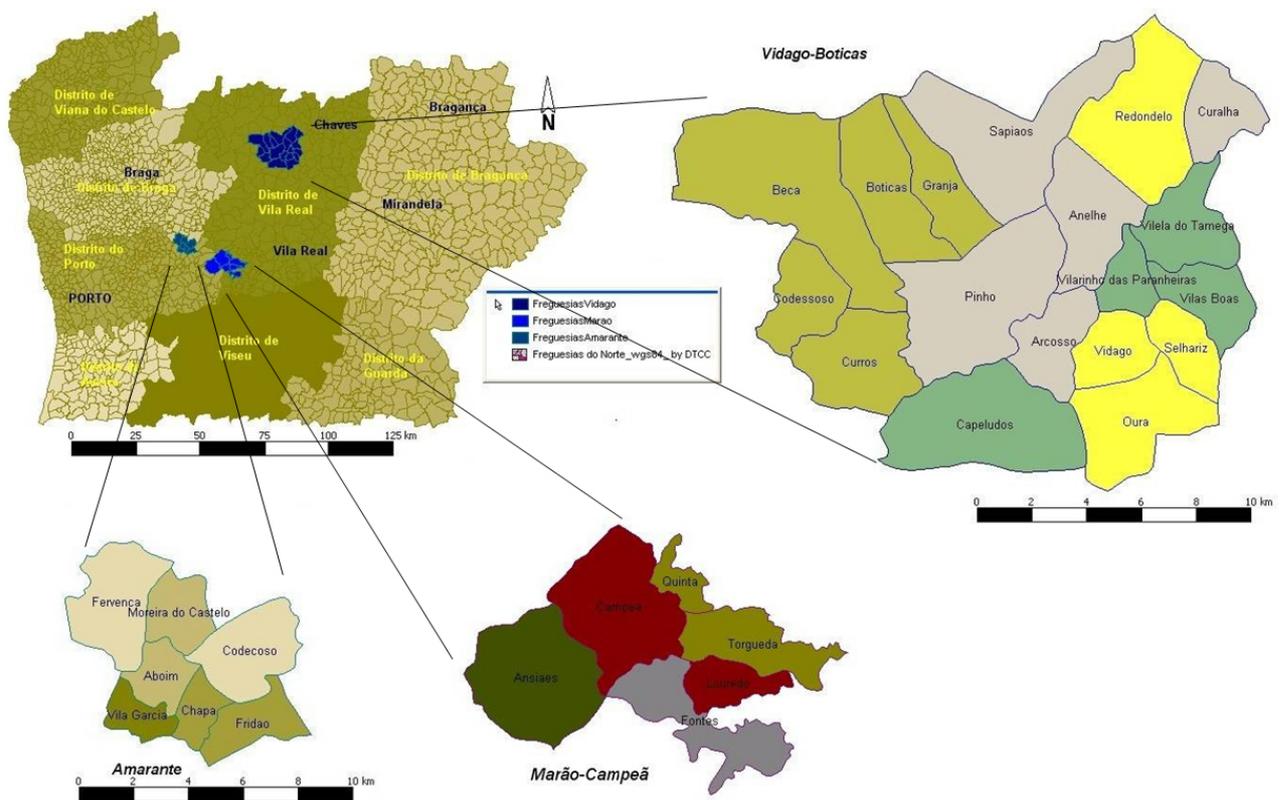


Figura 1 - Enquadramento regional e administrativo das áreas de estudo.

No Marão e no Vale do Alto Tâmega analisaram-se medições sobre Pinheiro bravo (*Pinus pinaster*). No entanto, no Marão, também se analisaram medições sobre povoamentos de Bétula (*Betula celtiberica*) e Pinheiro negral (*Pinus nigra*), e em Amarante – Aboim, apenas sobre Eucalipto (*Eucalyptus globulus*).

A zona seleccionada do Vale do Alto Tâmega compreende uma região entre Vidago e Boticas, situada nos distritos de Ribeira de Pena e Chaves. Está cartografada nas folhas 46 e

47 de cartografia topográfica nacional militar à escala de 1:25.000. Esta área de estudo insere-se na bacia hidrográfica do Rio Tâmega sendo por este atravessada no sentido NE-SW. Este curso de água e os seus afluentes e linhas de água situam-se num relevo relativamente acidentado. Dentro desta área de estudo a altitude mínima é 280m (Arcossó) e máxima 1145m (Boticas). A floresta mais importante é o pinhal, que se encontra de forma geral bastante mal gerido, com muito mato e com alta densidade de árvores. As freguesias de Anelhe, Vilarinho das Paranheiras, Pinho e Curros possuíam grandes extensões de pinhal que ardeu quase todo em 2002.

A zona seleccionada do Marão situa-se no distrito de Vila Real, freguesias de Campeã, Fontes e Ansiães, mais exactamente no vale da Campeã junto à EN15 e IP4, entre Campeã e o Alto do Espinho, estendendo-se para sul até próximo das Minas de “Maria Isabel”. Está cartografada na folha 114 da cartografia topográfica nacional militar 1:25.000. É uma zona tipicamente de montanha, situada nos andares Montano (700 a 1000m) e Altimontano (1000 a 1300m). Apresenta alguns planaltos de declive pouco pronunciado, contrastando com outras zonas de declive acentuado, que pode em certos casos ultrapassar os 30%. Apresenta aptidão florestal, sobretudo de conservação. As florestas aqui existentes são na sua maioria públicas (perímetro florestal de Marão e Meia Via), resultantes de plantações iniciadas em 1916 pelo Estado e doutras mais recentes na década de 60. (Araújo, 2004, Rego, 2001, Atlas do Ambiente, 1974a, 1974b, 1974c, Cardoso e Marado, 1971 e Albuquerque, 1954).

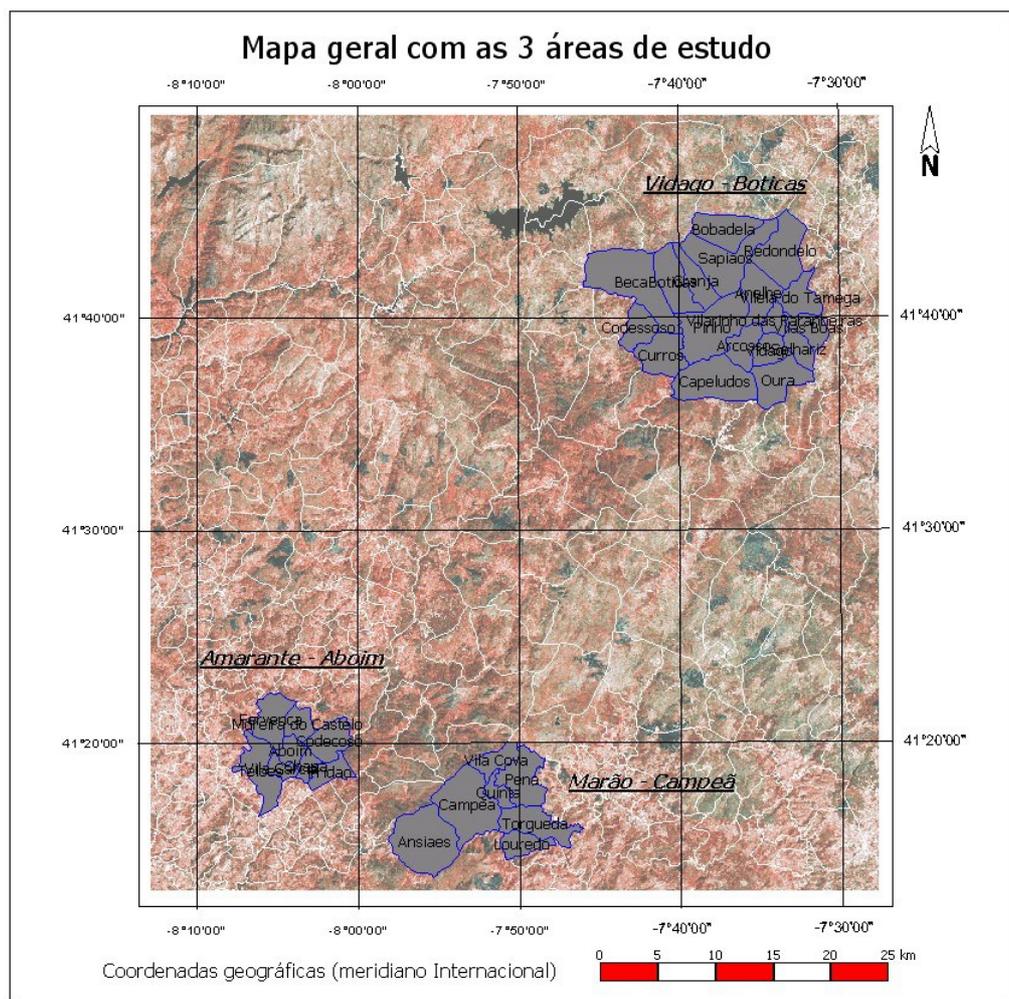


Figura 2 - Enquadramento geográfico das áreas de estudo.

A zona de Amarante – Aboim está cartografada na folha 100 de cartografia topográfica nacional militar à escala de 1:25.000. Foi aqui analisada a espécie *Eucalyptus globulus*. Esta área de estudo também se insere na bacia hidrográfica do Rio Tâmega, embora apenas atravessada por alguns dos seus afluentes (por ex.: Ribeira de Santa Ana). A orografia do terreno caracteriza-se por ser ondulada, com alguns vales cavados e com declives normalmente inferiores a 30%, embora nas encostas para a Ribeira de Santa Ana os declives possam ser superiores. O ponto mais alto está a 430m de altitude e o mais baixo a cerca de 200m. Esta área de estudo tem vocação essencialmente florestal, estando geralmente ocupada com Eucalipto, existindo todavia algumas manchas residuais de Pinheiro bravo.

A irregularidade fisiográfica provocou flutuação de escala nas FAPMF captadas.

Na Figura 2 os polígonos representam os limites das freguesias do local e envolventes. São indicadas lateralmente as coordenadas geográficas.

Material e métodos

A partir de pares de fotografias aéreas com sobreposição estereoscópica é possível realizar a medição de características físicas de povoamentos florestais (por ex.: a altura total, diâmetro de copa, densidade de copas, etc.) que por sua vez se poderão relacionar com outras características do povoamento (por ex.: volume de madeira por hectare) (Avery e Burkhart, 1994, Doruska, 1998, Zeide, 1999). Foi também referido por Gering *et al.* (1989) que para medições com rigor aceitável são necessárias fotografias aéreas com sobreposição de cerca de 60% e com escalas superiores a 1:10 000. Marques (1980) e mais recentemente Aranha (1998) demonstraram ser possível estimar o volume de madeira em pé, por hectare de *Pinus pinaster*, em Carrazeda de Ansiães e Vale do Tâmega respectivamente, através da medição da densidade de copas em fotografias aéreas convencionais com escala média 1:15 000. Como as fotografias comercialmente disponíveis apresentam escalas muito inferiores (1:40 000) e estão bastante desactualizadas (coberturas de 1995 e 2000), elas não servem para estas medições. É no entanto possível obter-se fotografia aérea de pequeno e médio formato com características adequadas para medições dendrométricas (Warner *et al.* 1996, Franklin, 2001, Castro *et al.*, 2004, Castro, 2004, Martins, 2004).

Altura de objectos

A determinação da altura de objectos a partir de pares fotográficos estereoscópicos implica a medição da altura de voo relativa ao objecto a medir, da paralaxe estereoscópica absoluta e da paralaxe diferencial. As paralaxes são normalmente medidas com uma barra de paralaxe e um estereoscópio de espelhos, utilizando o princípio da marca flutuante também aplicado aos estereorestituidores óptico-mecânicos.

De acordo com Warner *et al.* (1996), a precisão da estimativa da altura de objectos é função da distância do observador (altura de voo, H) e da distância entre pontos de observação (base fotográfica, B, que corresponde à distância no terreno entre os pontos principais de duas fotografias conjugadas) de acordo com a razão B/H. Quanto maior o valor dessa razão maior a precisão das medições. Por análise da Figura 3 verificou-se que se pode fazer variar esta razão alterando a altura de voo e/ou a distância focal da objectiva. Assim, no caso particular de medições de alturas de árvores devem escolher-se objectivas com maior campo de visão angular (CVA), de menor distância focal (f), proporcionando deste modo imagens com maior rebatimento. Repare-se ainda que $H/B = f/b$ (distância focal / base fotográfica à escala da fotografia).

Através das marcas fiduciais ou dos cantos das fotografias (no caso de câmaras não métricas) são encontrados os pontos centrais ou principais de cada fotografia (PP1 e PP2). A

fotografia da esquerda contém por isso o PP1 e o ponto principal conjugado da fotografia direita (PPC2) e reciprocamente a direita contém o PP2 e o PPC1 (Figura 4).

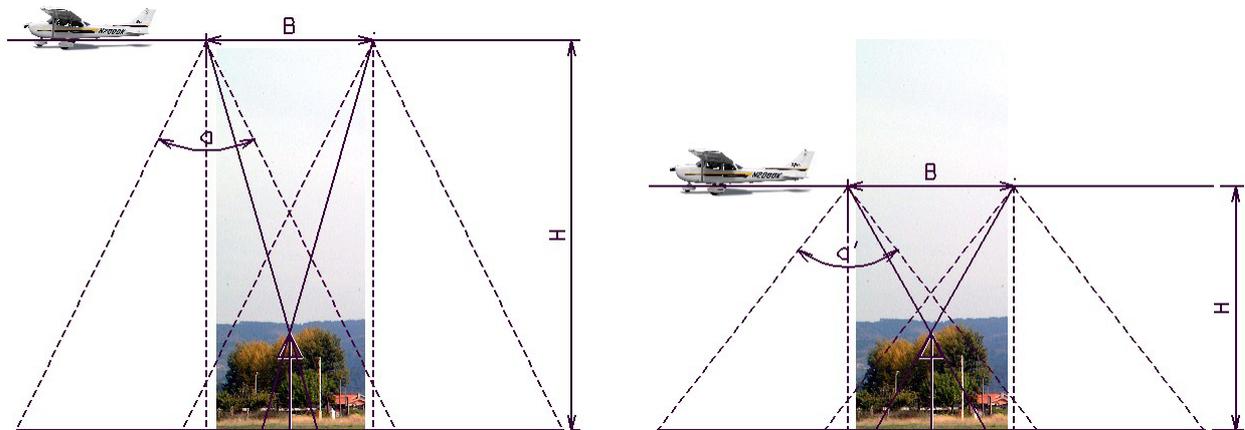


Figura 3 - Manipulações de B e H para determinação de alturas de objectos através de estereomodelos

O segmento de recta que une PP1 e PPC2 designa-se por linha de voo e a distância que separa esses dois pontos designa-se por base estereoscópica (b , medida sobre a fotografia e B , medida sobre o terreno). A distância sobre a fotografia entre PP1 e PPC2 será semelhante a PP2 e PPC1 em caso de terrenos planos. Em terrenos irregulares b é obtido como a média aritmética dessas duas distâncias. Tal como refere Warner *et al.* (1996), no caso de fotografias com inclinação exagerada, em vez dos pontos centrais das fotografias devem considerar-se os pontos nadir.

Para a medição da altura duma árvore (h) considera-se a paralaxe absoluta (H) como sendo o valor obtido para b do modo anteriormente indicado e a paralaxe diferencial (dP) como sendo a diferença das paralaxes estereoscópicas absolutas do topo e da base da árvore, medidas paralelamente à linha de voo (Figuras 5 e 6). A altura da árvore calcula-se então através da fórmula

$$\text{Eq. 1} \quad b = H \cdot \frac{dP}{P + dP}$$

em que: h = altura da árvore (m)
 H = altura de voo sobre esse local (m)
 dP = paralaxe diferencial (mm)
 P = paralaxe estereoscópica absoluta na base do objecto a medir (mm) (b)

Os aspectos geométricos relativos às fotografias aéreas e à estereoscopia estão bem esclarecidos nos manuais dos aparelhos (Wild e Topcon) ou nas obras de Lillesand e Kiefer (1987), Avery e Berlin (1992), Warner *et al.* (1996).

Medição de alturas através da paralaxe diferencial

Foi realizada uma missão aerofotográfica de captação de FAPMF com navegação aérea assistida por GPS ligado directamente a um computador portátil. O programa utilizado (MapSite) permite a exportação em ShapeFile das rotas executadas em 3D (Castro *et al.*, 2004). As alturas de voo relativas à base de cada objecto foram determinadas através da sobreposição num programa de desenho assistido por computador tridimensional (CAD 3D – Microstation v.95) das representações vectoriais correspondentes à rota efectuada, da

altimetria digital (adquirida ao IGeoE) e dos pontos relativos às parcelas, obtidos por GPS com correcção diferencial.

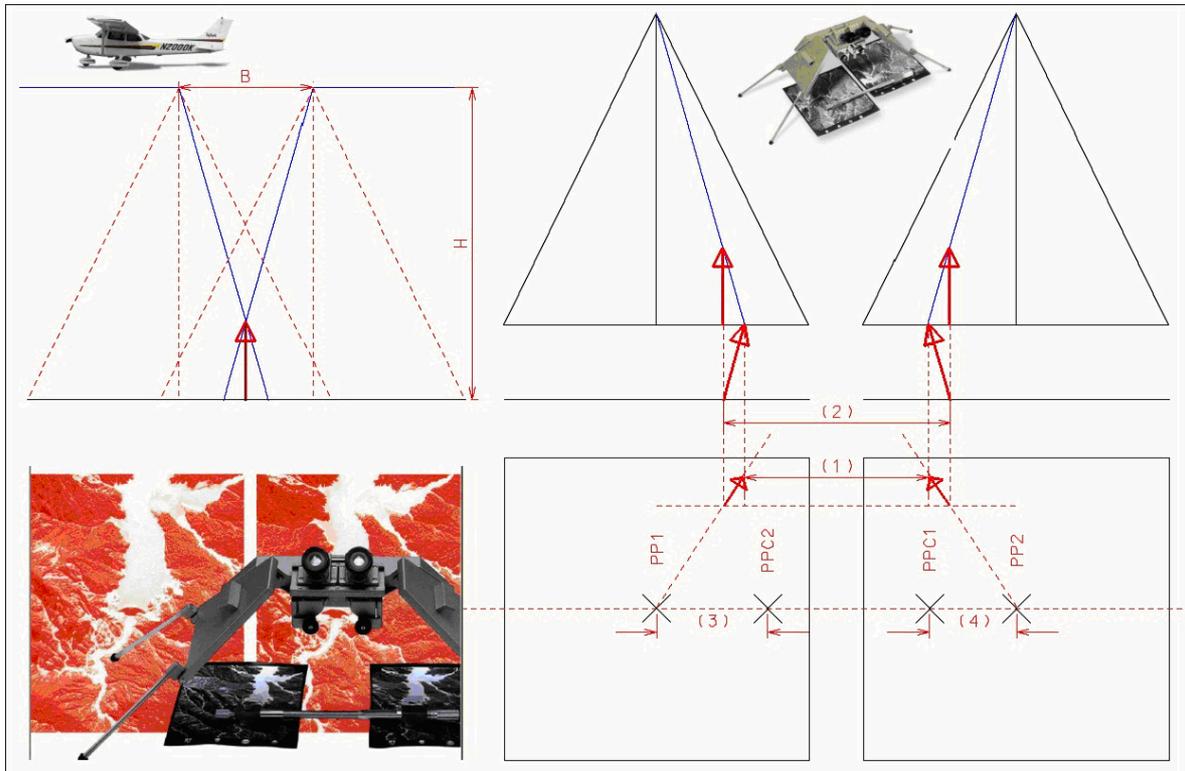


Figura 4 - A estereoscopia e a medição de alturas de objectos com a barra de paralaxe

Num povoamento florestal nem sempre é possível observar o solo através da fotografia aérea, quando está encoberto pelas copas. Este facto constitui um factor limitante da metodologia aqui apresentada mas que pode ser todavia ultrapassado, na maioria dos casos, por um fotointérprete experiente. A sobreposição da altimetria digital facilitou a pesquisa dum local para a visada da base do objecto a medir.

Dada a resolução espacial das imagens FAPMF, foi possível individualizar cada árvore amostra dentro duma dada parcela, mas nos povoamentos muito regulares essa tarefa revelou-se mais difícil. Para minimizar esta limitação, em cada parcela identificada na fotografia, foram encontradas as 10 árvores mais altas, medindo-se as suas alturas com a barra de paralaxe e determinando-se a sua média aritmética.

Neste estudo procedeu-se à estimativa da altura de árvores através da medição da sua paralaxe diferencial com estereoscópio de espelhos e barra de paralaxe (método PRX). Utilizou-se ainda o método de determinação da altura das árvores através de fotografias aéreas com sobreposição estereoscópica, que aplica os mesmos princípios da barra de paralaxe, consistindo na utilização da FAPMF digitalizada e o seu processamento através do CAD Microstation e extensão I/Ras C.

Desde que sejam visíveis a linha de solo situado à cota da base do objecto a medir e o topo desse objecto (neste caso cada árvore), é possível determinar-se P e dP. Nas Figuras 5 e 6 exemplifica-se a medição da altura dum poste de alta tensão pelos dois processos descritos, barra de paralaxe e CAD respectivamente. Com um hipsómetro de Blume Leiss foi medido esse poste no terreno ($h = 18,0$ m) para aferição dos resultados. Aplicando a Eq. 1 aos valores de P e dP e para uma altura de voo de 620 m verificou-se que as alturas do poste medidas através do CAD e da barra de paralaxe foram de 18,3m e 17,5m, respectivamente. A

percentagem de variação em relação ao valor real foi de 2% e 3%, respectivamente. Igual exercício foi feito nesse local com mais 9 árvores, de forma independente. Com a barra de paralaxe obtiveram-se percentagens de variação máxima, mínima e média respectivamente de 9%, 3% e 6%. Através da análise com o CAD obtiveram-se os valores de 9%, 1% e 4% respectivamente. Em face dos resultados obtidos nesta fase preliminar de testes, esta metodologia apresentou-se como exequível. Esta metodologia de medição de árvores foi por isso aplicada a todas as parcelas da área de estudo do Marão e Meia Via.

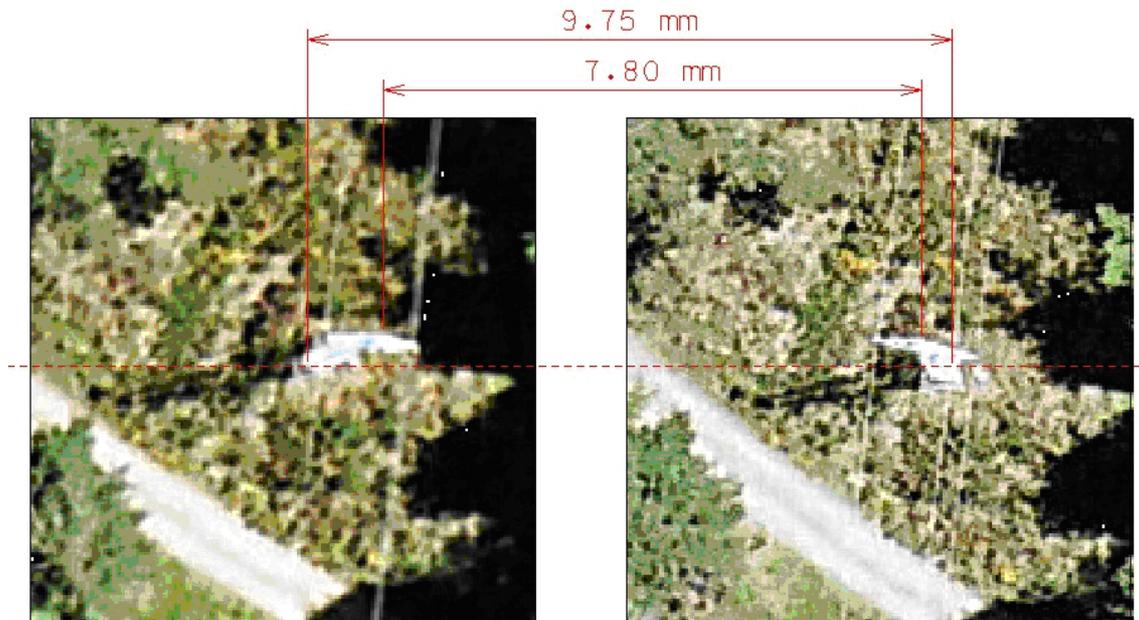


Figura 5 - Exemplo de medição de altura de um objecto com uma barra de paralaxe

Análise dos resultados

Considerando todas as medições disponíveis de alturas (hd , $hCAD$ e $hPRX$) referentes a todas as parcelas do Marão, e assumindo que os valores obtidos não dependem da espécie, avaliou-se a igualdade estatística dos valores através dum teste t de Student heterocedástico, tendo-se verificado não existirem diferenças significativas entre hd e $hCAD$, $t[hd; hCAD]=0.08937$, $gl=9$, $P= 0.9307$. Já entre hd e $hPRX$ e entre $hPRX$ e $hCAD$ ocorreram diferenças nos valores obtidos: $t[hd; hPRX]=4.318$, $gl=9$, $P= 0.0019^{**}$; $t[hPRX; hCAD]=2.996$, $gl=9$, $P= 0.0151^*$. Os resultados permitem concluir que a medição directa da altura dominante pelo processo CAD foi mais segura do que a medição através do processo PRX. Aplicando a mesma metodologia, com excepção do método da barra de paralaxe que se exclui, para várias espécies e locais diferentes, sobre 105 parcelas de 500 m^2 , concluiu-se também não haverem diferenças significativas nas medições entre hd e $hCAD$ para as várias espécies florestais: Bétula no Marão-Campeã ($P= 0.3847$), Pinheiro negral no Marão-Campeã ($P= 0.7729$), Eucalipto em Amarante-Aboim ($P= 0.9704$), Pinheiro bravo em Vidago-Boticas ($P= 0.7615$).

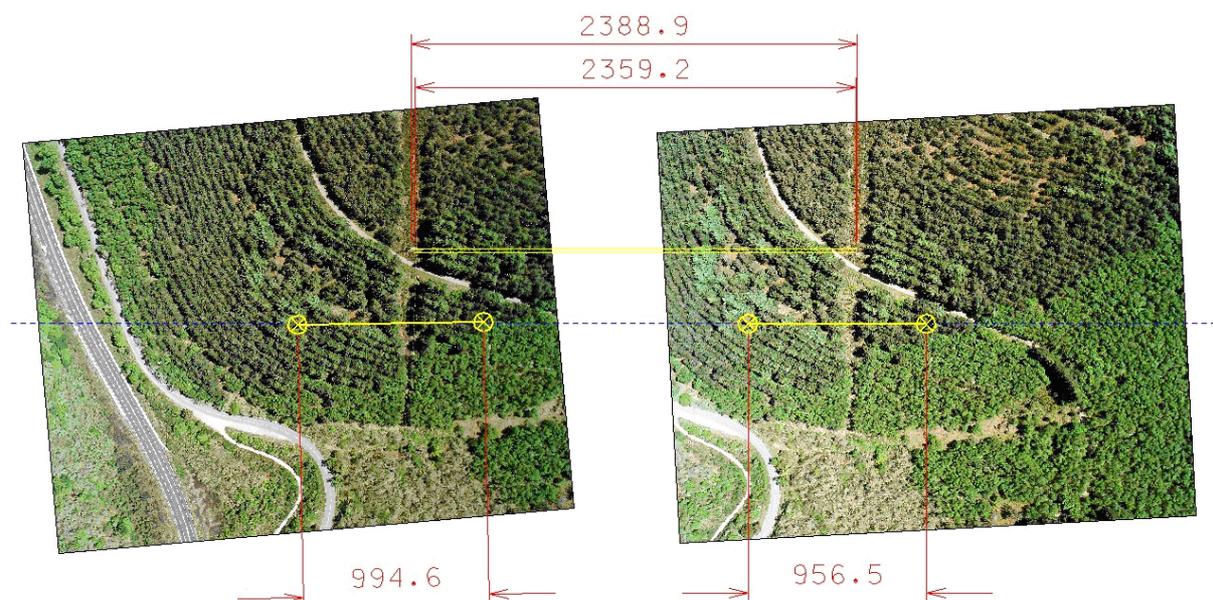


Figura 6 - Aplicação de CAD para a determinação das paralaxes absoluta e diferencial (valores adimensionais uma vez que as unidades são relativas – fotografia da direita; fotografia da esquerda)

Conclusões

O processo CAD exige a digitalização prévia dos negativos das fotografias (no caso de serem adquiridas por uma câmara analógica, o que é dispensável no caso das fotografias digitais) e do programa CAD Microstation, cujo custo é de cerca de 1500Euros. Este processo demonstrou ser de maior facilidade de aplicação e requerer menor nível de especialização por parte do utilizador para a medição das alturas, desde que sejam bem visíveis quer a flecha quer a base do tronco das árvores. Aliás, este requisito é também fundamental para a medição com a barra de paralaxe. Finalmente, o processo PRX necessita da impressão das fotografias em papel fotográfico e duma barra de paralaxe com custos relativamente superiores aos do programa CAD (aproximadamente de 2500euros).

As metodologias aqui descritas constituem perspectivas de utilização futura no Inventário Florestal de povoamentos correctamente ordenados, com vantagens económicas e temporais, o que justifica a sua difusão.

Agradecimentos

A equipa de trabalho gostaria de agradecer ao piloto dos voos para fotografia aérea (José Barreira), ao colega Eng. Domingos Lopes e seus pais, ao Técnico de 1ª Carlos Pinto de Brito e ao Téc. Prof. de 2ª Carlos Alberto Madeira Guerra Fernandes nos trabalhos de campo.

Agradecemos também ao IGeoE a cedência de informação vectorial digital, ao ex-CNIG a cedência de ortofotografia digital, e igualmente à empresa “Aliança Florestal” a amável cedência da cartografia e informação relativa aos povoamentos de Amarante-Aboim e a permissão para aí realizar os estudos necessários.

Agradecemos finalmente à Circunscrição Florestal de Vila Real e à Direcção Geral das Florestas a possibilidade de realizar o estudo no perímetro florestal de Marão e Meia Via, e ainda a cedência de valiosa informação por parte da sua biblioteca geral.

Referências Bibliográficas

- Albuquerque, P.M., 1954. Carta Ecológica de Portugal. DGSA, Lisboa, Portugal. in Adaptação à base cartográfica do Atlas do Ambiente: CNA; Fotografia e Impressão - Instituto Hidrográfico, 1984.
- Aranha, J.T.M., 1998. An integrated geographical information system for the Vale do Alto Tâmega (GISVAT). Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. Kingston University. England.
- Araújo, J.A.T., Figueiredo, T., Castro, J.P.M., 2004. Sistema de Informação Geográfica da Carta de Solos do Nordeste de Portugal. CICS2004 – I Congresso Ibérico da Ciência do Solo, Escola Superior Agrária de Bragança, 15 a 18 de Junho. [Poster].
- Atlas do Ambiente, 1974a. Carta da Precipitação (Quantidade Total). Valores Médios Anuais (mm). Período 1931-1960. Serviço Meteorológico Nacional. 1974. Desenho e Montagem - D.G. dos Recursos Florestais; Fotografia e Impressão - Instituto Hidrográfico, 1975.
- Atlas do Ambiente, 1974b. Carta da Temperatura (Temperatura média diária do ar). Valores Médios Anuais (graus centígrados). Período 1931-1960. Serviço Meteorológico Nacional. 1974. Desenho e Montagem - D.G. dos Recursos Florestais; Fotografia e Impressão - Instituto Hidrográfico, 1975.
- Atlas do Ambiente, 1974c. Carta da Geada (Duração da época no ano agrícola - Outubro a Setembro). Valores Médios Anuais (meses). Período 1941-1960. Serviço Meteorológico Nacional. 1974. Desenho e Montagem - D.G. dos Recursos Florestais; Fotografia e Impressão - Instituto Hidrográfico, 1975.
- Avery, T.E. e Berlin, G.L., 1992. Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation. V Ed. Macmillan Publishing Company. New York.
- Avery, T.E. e Burkhart, H. E., 1994. Forest Measurements. Fourth Edition. McGraw-Hill, Inc. New York. ISBN 0070025568.
- Cardoso, J.C., Marado, M.B., 1971. Carta de Solos do Serviço de Reconhecimento e Ordenamento Agrário. DGSA, Lisboa, Portugal. in Adaptação à base cartográfica do Atlas do Ambiente: CNA; Fotografia e Impressão - Instituto Hidrográfico, 1978.
- Castro, J.P.M., 2004. Aplicação da Detecção Remota em Inventário Florestal. Tese de Doutoramento em Ciências Florestais. UTAD, Vila Real, 274 pp, Setembro de 2004 (submetido).
- Castro, J.P.M., Martins, L.M., Aranha, J.T., Macedo, F.W., 2004. Sistema de Navegação para Fotografia Aérea de Pequeno e Médio Formato. Silva Lusitana **12**(2): 213-225, 2004. Estação Florestal Nacional, Lisboa. Portugal.
- Doruska, Paul F., 1998. Methods for Quantitatively Describing Tree Crown Profiles of Loblolly pine (*Pinus taeda* L.). Dissertação de doutoramento. Virginia Polytechnic Institute and State University. USA, 129 pp.
- Franklin, S.E., 2001. Remote Sensing for Sustainable Forest Management. CRC Press, Inc. New York.
- [http 1: www.sres.anu.edu.au/ associated/ mensuration/ brackhandwood1998/ crown.htm](http://www.sres.anu.edu.au/associated/mensuration/brackhandwood1998/crown.htm) (01/03/2004)

- Gering, Lawrence R., May, Dennis M., Teuber, Kurt B. 1989. The use of aerial photographs and angle-gauge sampling of tree crown diameters for forest inventory. In: State-of-the-art methodology of forest inventory: a symposium proceedings. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station: 286-289.
- Lillesand, T. M. e Kiefer, R. W., 1987. "Remote Sensing and Image Interpretation". 2ª Ed. John Wiley & Sons. U.S.A.
- Marques, C.P., 1980. Aplicação do Método das Tabelas de Volume Aéreas. (Inventário de Povoamentos Regulares de Pinheiro bravo no concelho de Carrazeda de Ansiães, distrito de Bragança). Instituto Universitário de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.
- Marques, C.P., 2001. Apontamentos de Detecção Remota. UTAD, Vila Real, Portugal.
- Marques, C.P., Lopes, D., Fonseca, T., 2001. Apontamentos de Inventário Florestal. UTAD, Vila Real, Portugal.
- Martins, L. M. F. P. M. 2004. Monitorização da doença da tinta do castanheiro com fotografia aérea de pequeno formato. Tese de Doutoramento, UTAD, Vila Real, 247 pp.
- Rego, F.C., 2001. Florestas públicas. Direcção Geral das Florestas. Lisboa.
- Warner, W. S. 1994. Evaluating a low-cost, non-metric aerial mapping system for waste site investigation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **60**(8): 983-988.
- Warner, W.S., Graham, R.W., Read, R.E., 1996. *Small Format Aerial Photography*. ASPRS. USA. ISBN 1-57083-034-7.
- Zeide, B., 1999. Contemporary issues of forest science. UTAD. Department of Forestry. Workshop: november 22-December 3, 1999.