



EPS

Escola Politècnica

Superior

Projecte/Treball Fi de Carrera

Estudi: Eng. Tècn. Agrícola Explotacions. Agropec. Pla 99

Títol: Comparació de la tecnologia LiDAR vers els mètodes tradicionals d'inventari forestal, a la finca La Vall de Benifallet, al Baix Ebre.

Document: Memòria

Alumne: Raquel Martínez García

Director/Tutor: Miquel Fabra i Crespo/Miquel Duran i Ros

Departament: Eng. Química, Agrària i Tecn. Agroalimentaria

Àrea: Enginyeria Agroforestal

Convocatòria (mes/any): Setembre 2012

ÍNDEX

ÍNDEX DE TAULES

ÍNDEX DE FIGURES

AGRAÏMENTS

RESUM

1. INTRODUCCIÓ	1
1.1. ANTECEDENTS.....	3
1.2. JUSTIFICACIÓ.....	5
1.3. OBJECTIUS	6
2. MATERIAL I MÈTODES	7
2.1. CARACTERÍSTIQUES DE L'ÀREA D'ESTUDI	7
2.1.1. Localització	7
2.1.2. Descripció de la finca.....	9
2.1.3. El clima de la zona.....	9
2.1.4. La vegetació.....	11
2.2. METODOLOGIA DEL PROJECTE.....	12
2.3. L'INVENTARI FORESTAL TRADICIONAL.....	13
2.3.1. Divisió inventarial	13
2.3.1.1. Estratificació de la massa arbrada.....	14
2.3.1.2. Característiques de les parcel·les	15
2.3.2. Intensitat del mostreig.....	16
2.3.3. Inventari forestal	17
2.3.3.1. Aparells de mesura	19
2.3.3.2. Variables dasomètriques mesurades a camp.....	21
2.3.3.3. Càlcul de l'àrea basimètrica i altres paràmetres.....	23

2.4. METODOLOGIA LIDAR.....	26
2.4.1. Generalitats de la tecnologia LiDAR.....	26
2.4.2. Metodologia i tractament de les dades LiDAR	29
2.4.2.1. Determinació de la densitat d'arbrat	31
2.4.2.2. Determinació de l'alçada dels arbres.....	35
2.4.2.3. Determinació de la fracció de cabuda coberta	36
3. TRACTAMENT I ANÀLISI ESTADÍSTIC	38
3.1. Anàlisi de regressions	38
3.2. Anàlisi de diferències de mitjanes.....	39
4. RESULTATS	41
4.1. Resultats a nivell parcel·la	41
4.1.1. Variable densitat	41
4.1.2. Variable alçada	46
4.2. Resultats a nivell estrat	50
4.2.1. Densitat a nivell d'estrat.....	51
4.2.2. Alçada a nivell estrat.....	54
4.2.3. FCC a nivell estrat	57
5. VALORACIÓ ECONÓMICA	60
6. DISCUSSIÓ	63
7. CONCLUSIONS	68
8. BIBLIOGRAFIA	70

ÍNDIX DE TAULES

Taula 1. Característiques del vol LiDAR	29
Taula 2. Tipus de pixelat adequat per a cadascú dels rangs de densitat. Font: elaboració pròpia (Adaptació, Reyna <i>et al</i> , 2010)	33
Taula 3. Densitats obtingudes utilitzant el mètode tradicional i les dues resolucions del mètode LiDAR. Les unitats són peus/parcel·la.	42
Taula 4. Estadístics de la densitat.....	44
Taula 5. Errors en l'estimació de la variable densitat. (EM) error mig, (EMA) error mig absolut, (PEMA) percentatge d'error mig absolut,(RMSE) error quadràtic mig, (E. típic) error típic.	44
Taula 6. Resultats de la variable alçada per les dues resolucions del LiDAR i per al mètode tradicional	46
Taula 7. Estadístics de l'alçada.....	47
Taula 8. Errors en l'estimació de la variable alçada. En el mètode LiDAR l'estimació s'ha realitzat amb els dos tipus de resolució, 8 i 24 píxels. (EM) error mig, (EMA) error mig absolut, (PEMA) percentatge d'error mig absolut, (RMSE) error quadràtic mig, (E.típic) error típic.	48
Taula 9. Resultats de l'àrea basimètrica per cada estrat i la comprovació d'errors. (AB) Àrea basimètrica, Desviació típica, (CV) Coeficient de variació, (n) nombre de parcel·les.....	50
Taula 10. Densitats obtingudes per cada estrat en funció del mètode utilitzat per a obtenir-les. El resultat es dona en nombre de peus per cada estrat.	51
Taula 11. Estadístics de la densitat a nivell estrat, per LiDAR de 8 i 24 píxels i pel mètode tradicional.	52
Taula 12. Errors en l'estimació de la variable densitat a nivell estrat, obtinguts pels dos tipus de resolució, 8 i 24 píxels. (EM) error mig, (EMA) error mig absolut, (PEMA) percentatge d'error mig absolut, (RMSE) error quadràtic mig, (E.típico) error típic. Font: elaboració pròpia.	53
Taula 13. Alçades obtingudes per cada estrat en funció del mètode utilitzat per obtenir-les.....	54
Taula 14. Estadístics de la variable alçada, per LiDAR de 8 i 24 píxels i pel mètode tradicional.....	55
Taula 15. Errors en l'estimació de la variable alçada a nivell estrats, obtinguts pels dos tipus de resolució, 8 i 24 píxels. (EM) error mig, (EMA) error mig absolut, (PEMA) percentatge d'error mig absolut, (RMSE) error quadràtic mig, (E.típic) error típic.	56
Taula 16. Fracció de cabuda coberta per cada estrat, obtinguda utilitzant el mètode tradicional i el mètode LiDAR.....	57
Taula 17. Estadístics de la variable FCC a nivell estrats.	58
Taula 18. Errors en l'estimació de la variable FCC a nivell estrat. (EM) error mig, (EMA) error mig absolut, (PEMA) percentatge d'error mig absolut, (RMSE) error quadràtic mig, (E.típic) error típic.	58
Taula 19. Preus de l'inventari tradicional. (Colegio Ingenieros de Montes, 2004).....	60
Taula 20. Cost per superfície pel processat de dades LiDAR en inventari. Font: Fabra <i>et al</i> , 2010a. .	61
Taula 21. Costos segons les fases de l'inventari	62
Taula 22. Preus orientatius de mercat amb la tecnologia LiDAR.....	62

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1. Evolució de la disponibilitat de dades LiDAR a Espanya amb el PNOA. Font: Instituto Geográfico Nacional, 2012.	4
Figura 2. Localització del terme municipal de Benifallet dins la província de Tarragona	7
Figura 3. A) Situació de Benifallet (punt vermell) i situació de la finca (punt groc). B) Ortofoto de la finca La Vall.	8
Figura 4. Dades de precipitació i temperatura a la comarca del Baix Ebre en el període 1971-2000. Font: Servei Meteorològic de Catalunya, 2012	10
Figura 5. Acrònims de la Figura 4. Font: Servei Meteorològic de Catalunya , 2012.....	10
Figura 6. Bosc de pi blanc amb gran varietat de sotabosc. Font: elaboració pròpia	11
Figura 7. Imatge de la fitxa d'inventari que es va utilitzar en les parcel·les. (CPF, 2010)	18
Figura 8. Imatge de la visió a través del densitòmetre (Ruiz, 2009).....	20
Figura 9. Imatges dels aparells de mesura per realitzar l'inventari. A) forcípula, B) distanciómetre, C) GPS, D) densitòmetre. Font: elaboració pròpia.....	20
Figura 10. Prenent mides de diàmetres amb forcípula . Font: elaboració pròpia.	22
Figura 11. Captura de l'aplicació LIFOR on es veu l'estructura de l'inventari amb els diferents estrats i les seves parcel·les. Font: Elaboració pròpia.....	24
Figura 12. Dispositius per l'adquisició de dades amb sensor làser aerotransportat. (Davara <i>et al</i> , 2008).....	27
Figura 13. Comportament del raig làser sobre les superfícies vegetals (INEGI, 2012).....	28
Figura 14. Tres imatges de la finca en estudi. Les línies vermelles són els límits dels estrats. A) MDS B) MDT C) MDC, resultat de restar MDS-MDT. Font: elaboració pròpia.	29
Figura 15. A) Model Digital de Superfície (MDS), B) Model Digital del Terreny (MDT). (Garcia, 2009)	30
Figura 16. Perfil transversal de la capa LAS (1 pols/m ²) on es poden observar els màxims i mínims relatius de les capçades dels arbres (Reyna, S., <i>et al</i> , 2010).	31
Figura 17. Esquema d'un píxel que és màxim relatiu respecte dels adjacents (vermell). En groc els píxels de la primera fila que es comparen amb el central i en marró la segona fila de píxels quan s'amplien els píxels que es comparen amb el central. Els números indiquen la numeració correlativa dels píxels. h>, és el màxim relatiu (Reyna <i>et al</i> ,2010).	32
Figura 18. Detecció d'arbres segons el pixelat. A) pixelat de h>8, LiDAR detecta 4 arbres. B) pixelat de h>24, LiDAR detecta 2 arbres (Fabra <i>et al</i> , 2010b).	33
Figura 19. Imatge de la finca en estudi. A) Amb capa d'arbres detectats amb LiDAR amb 8 píxels. B) Capa d'arbres detectats amb LIDAR amb 24 píxels. Font: Elaboració pròpia.	34
Figura 20. Mesures d'alçada amb LiDAR sobre una massa de <i>Pinus halepensis</i> (Fabra <i>et al</i> , 2010b)	35
Figura 21. Determinació de la FCC a partir de dades LiDAR.A) Visió amb ortofotografia . B) Visió de la capa binomial: on hi ha vegetació és blanc i on no n'hi ha és negre. C) FCC amb eliminació de píxels a l'interior de les copes (Reyna <i>et al</i> ,2010).....	36

Figura 22. Relació entre la densitat a nivell parcel·la, mesurada amb LiDAR a 8 i 24 píxels i mesurada amb el mètode tradicional.....	43
Figura 23. Relació entre la densitat mesurada amb el mètode tradicional i amb el LiDAR. En aquesta cas s'ha fet una tria de la resolució del LiDAR en funció de les densitats de les parcel·les.	44
Figura 24. Diagrama de caixes corresponents al dos mètodes estudiats per la variable densitat	45
Figura 25. Relació entre l'alçada mesurada amb LiDAR a 8 i 24 píxels i l'alçada mesurada amb el mètode tradicional.....	47
Figura 26. A) Gràfic de caixes de la variable alçada analitzada amb els dos mètodes, tradicional i LiDAR amb 8 píxels de resolució. B) Gràfic de caixes de la variable alçada analitzada amb els dos mètodes, tradicional i LiDAR amb 24 píxels de resolució.	49
Figura 27. Relació entre la variable densitat mesurada amb mètode tradicional i amb LiDAR a nivell dels estrats. En aquest cas les dades del tradicional són extrapolades des de les parcel·les. ...	52
Figura 28. Gràfic de caixes i bigotis de la variable densitat a nivell estrat. A) La variable està mesura amb LiDAR x8 píxels. B) La variable està mesurada amb LiDAR x24 píxels.	54
Figura 29. Relació entre la variable alçada, mesurada amb el mètode tradicional i amb el LiDAR(a 8 i 24 píxels), a nivell dels estrats. Font: elaboració pròpia.....	55
Figura 30. Gràfic de caixes i bigotis de la variable alçada a nivell estrat. A) La variable està mesura amb LiDAR x8 píxels. B) La variable està mesurada amb LiDAR x24 píxels.	56
Figura 31. Relació entre la variable fracció de coberta (FCC) mesurada amb LiDAR i amb el mètode tradicional. Font: elaboració pròpia.	58
Figura 32. Gràfic de caixes i bigotis de la variable FCC a nivell d'estrats.	59

AGRAÏMENTS

En primer lloc, agrair a l'empresa Balma Forestal SLP l'oportunitat que m'ha donat per a realitzar aquest treball, facilitant tots els mitjans perquè es pogués dur a terme, en particular al director del treball, el Dr. Miquel Fabra i Crespo i al seu soci Marc Garfella.

Al Dr. Miquel Duran i Ros per ser el meu tutor i revisar tan curosament els previs que amb tan poc temps li he hagut de passar.

Al propietari de la finca Josep Mestre i Lagarriga, per la seva col·laboració en la realització dels inventaris.

Finalment a la família i a totes les persones que m'han donat suport fent possible la realització d'aquest treball.

Sincerament, gràcies a tots.

RESUM

L'inventari forestal és una eina molt important per obtenir la informació necessària, sobre una massa arbrada, respecte a la seva situació actual i la seva possible evolució en el temps, a fi i efecte de poder prendre les decisions necessàries sobre la seva planificació i gestió. Amb aquest treball s'ha volgut avaluar la possible millora que es pot obtenir aplicant les noves tecnologies en la realització dels inventaris forestals, com la tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging).

El mètode tradicional de realitzar un inventari forestal, consisteix en anar a camp i prendre dades d'unes mostres representatives, de les variables dasomètriques que caracteritzen una massa forestal.

La tecnologia LiDAR és un sistema de teledetecció que calcula distàncies a partir de, la mesura del temps entre l'emissió d'un làser polsat i el seu retorn després de la seva reflexió en tocar terra. El resultat és un núvol de punts a diferents alçades, amb el qual s'aconsegueix un Model Digital del Terreny (MDT) i un Model Digital de Superfície (MDS). De la resta d'aquests dos models s'obté una imatge de l'estructura vertical de la vegetació, a partir de la qual es poden deduir dades bàsiques del bosc amb mesures per tot el territori.

L'àrea d'estudi on es va dur a terme el present treball, és una finca del terme municipal de Benifallet, al Baix Ebre, província de Tarragona. L'estudi ha consistit en la comparació dels dos mètodes, tradicional i LiDAR, a l'hora d'obtenir les variables de densitat, alçada i fracció de cabuda coberta (FCC). El mètode tradicional consisteix en mesurar les variables en 24 parcel·les representatives i posteriorment, en extrapolar-les als estrats, que són les unitats en que es divideix la part de la finca on es realitza l'inventari. En el mètode utilitzant la tecnologia LiDAR, s'utilitzen dos tipus de resolucions (8 píxels i 24 píxels) a l'hora de treballar amb les dades.

Pel que fa als resultats, els models de predicció de la densitat, alçada i FCC van presentar uns coeficients de determinació, al considerar com a unitat d'estudi l'estrat, millors que els de les parcel·les. La densitat va presentar un millor resultat quan el tipus de resolució del LiDAR era de 8 píxels amb un $R^2= 0.97$. En canvi l'alçada va presentar el millor resultat quan el tipus de resolució del LiDAR era de 24 píxels, amb un $R^2= 0.81$. Pel que fa a la FCC, només es va estudiar a nivell estrat i el resultat va ser d'un R^2 de 0.69. La conclusió va ser que el mètode LiDAR millora els seus resultats a l'augmentar la superfície d'estudi.

Els anàlisis realitzats han mostrat la importància d'utilitzar una resolució adequada en el mètode LiDAR, sobretot en l'estimació de la variable densitat. Per altra banda, l'estimació de les variables milloraria considerablement amb densitats de punts, del vol LiDAR, superiors als 0.5 punts/m².

1. INTRODUCCIÓ

La gestió forestal engloba les activitats que es realitzen al bosc amb l'objectiu de mantenir-lo, transformar-lo, obtenir-ne beneficis o reconstruir-lo. En el Mediterrani on la pressió humana és molt forta, cal gestionar els boscos intervenint-hi de manera directa i indirecta. Els criteris emprats es basen en la conservació, la silvicultura i la prevenció d'incendis forestals (Castelló *et al*, 2001).

Una característica molt important dels boscos mediterranis a l'hora de gestionar-los és que suposen un baix rendiment econòmic. Es tracta de boscos heterogenis que tenen gran diversitat de medis físic i vegetal, amb gran variabilitat climàtica, elevada pressió antròpica, presència freqüent d'incendis, amb elevada fragmentació de la propietat forestal, etc. Tots aquests factors fan difícil l'estabilitat i la regeneració de les masses forestals i tota aquesta incertesa, juntament amb el baix rendiment, es reflexa una manca de gestió.

El Centre de la Propietat Forestal (CPF) és l'organisme de l'Administració Pública que a Catalunya regula, supervisa i aprova el contingut dels plans tècnics de gestió i millora forestal. Un pla tècnic de gestió i millora forestal (d'ara endavant, PTGMF) és un instrument per l'ordenació forestal de finques rústiques de titularitat privada, amb el que es planifiquen les actuacions que cal dur a terme a mitjà i llarg termini, normalment entre deu i trenta anys, en els quals cal intentar assolir uns objectius bàsics proposats per a la forest. Tant per a la proposta d'aquests objectius com per a la planificació de les actuacions necessàries per assolir-los, és imprescindible conèixer la situació de la qual es parteix i la possible evolució que en el temps tindrà la forest. Un cop passat aquest temps es realitza una revisió per avaluar els èxits i errors de l'anterior planificació i s'adapta a la sempre canviant realitat socioeconòmica.

La revisió del PTGMF que es fa un cop exhaurit el període de vigència ha d'anar acompanyada de la realització de l'inventari corresponent, ja que els canvis produïts en la superfície ordenada a causa de l'execució de les actuacions planificades, juntament amb la dinàmica natural de les masses boscoses, són normalment canvis substancials, tant a escala quantitativa com qualitativa, que s'han de tenir en compte a l'hora de fer la revisió del pla (CPF, 2010).

El PTGMF es pot referir a una o més finques d'un sol propietari o d'una agrupació de propietaris i la superfície mínima a partir de la qual es pot ordenar mitjançant aquest instrument és de 25 ha.

El document bàsic per la realització d'un PTGMF és l'inventari forestal, que serveix per determinar la superfície ocupada pel bosc, quantificar els recursos i les possibilitats existents i planificar la gestió futura del bosc.

Davant la necessitat de gestió el primer pas en tot procés de planificació és la fase d'anàlisi, que en aquest cas seria l'inventari forestal i el seguiment a gran escala de la dinàmica de les estructures forestals. Aquests treballs tenen unes despeses elevades i per això, el primer esforç és automatitzar els processos i disminuir les despeses. Per aconseguir-ho es poden desenvolupar i aplicar les últimes tecnologies disponibles, amb un major grau d'anàlisi i una major precisió que els mètodes tradicionals. L'aplicació de la tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging) en treballs forestals suposa un gran avanç pel fet de poder abastar grans extensions de terreny en breu espai de temps (per la possibilitat d'automatització) i obtenir variables forestals importants per a l'inventari i l'ordenació de forest.

1.1. ANTECEDENTS

Els antecedents en la utilització de la tecnologia LiDAR en el sector forestal es troben en països on el sector forestal és un recurs econòmic molt potent com Suècia, Finlàndia o Noruega. A Suècia es va començar a utilitzar a mitjans de la dècada dels 80 amb un escàner làser militar (FLASH) arribant a la conclusió que mitjançant regressions amb parcel·les de camp, es podien determinar paràmetres dasomètrics, que són aquells que caracteritzen una massa arbrada. Al mateix temps la companyia SAAB, a Suècia, construeix TopEye, que es va fer servir durant sis campanyes forestals entre 1997 i 2003. Al 1990 comença la seva utilització a Finlàndia, on es va fer especial atenció a la generació de MDT's (Model Digital del Terreny) en terrenys forestals. Al 1995 la universitat d'Oslo, a Noruega, realitza un projecte pilot amb l'empresa Fotonor (Sandefjord, Noruega) on es van obtenir amb èxit l'alçada mitja i el volum de fusta de 36 rodals (Davara *et al*, 2008).

A l'Estat Espanyol el Ministeri de Foment va posar en marxa l'any 2004 el PNOA (Plan Nacional de Ortofotografia Aérea), fruit de la Directiva Europea INSPIRE, que pretén establir una infraestructura de dades geogràfiques a Europa. L'objectiu és obtenir ortofotografies aèries digitals amb resolució de 25 o 50 cm i models digitals d'elevacions (MDE) d'alta precisió a partir de dades LiDAR, amb una densitat mitja de 0,5 punts/m². El projecte es troba en constant evolució, adaptant-se a les necessitats dels usuaris i al desenvolupament de les noves tecnologies. L'any 2009, una sèrie d'usuaris, van plantejar la necessitat de l'obtenció de Models Digitals de Terreny d'alta precisió, per la realització de cartografia d'àrees d'inundació, projectes de carreteres, inventaris forestals, etc. (Instituto Geográfico Nacional, 2012). A la Figura 1 es pot observar l'evolució de la disponibilitat de dades LiDAR a l'Estat Espanyol.

Tradicionalment l'accés a les dades LiDAR ha estat limitat a un nombre reduït d'usuaris molt especialitzats i per unes aplicacions molt concretes que es podien permetre l'elevat cost de l'adquisició aquest tipus de dades. No obstant, cada cop hi ha més dades LiDAR disponibles a preus reduïts o fins i tot gratuïts, com les que ofereix el PNOA; aquest fet fa augmentar les possibilitats d'ús d'aquesta tecnologia per a qualsevol aplicació on sigui necessària l'alçada del terreny o dels objectes que hi ha a una superfície (Dielmo, 2012).

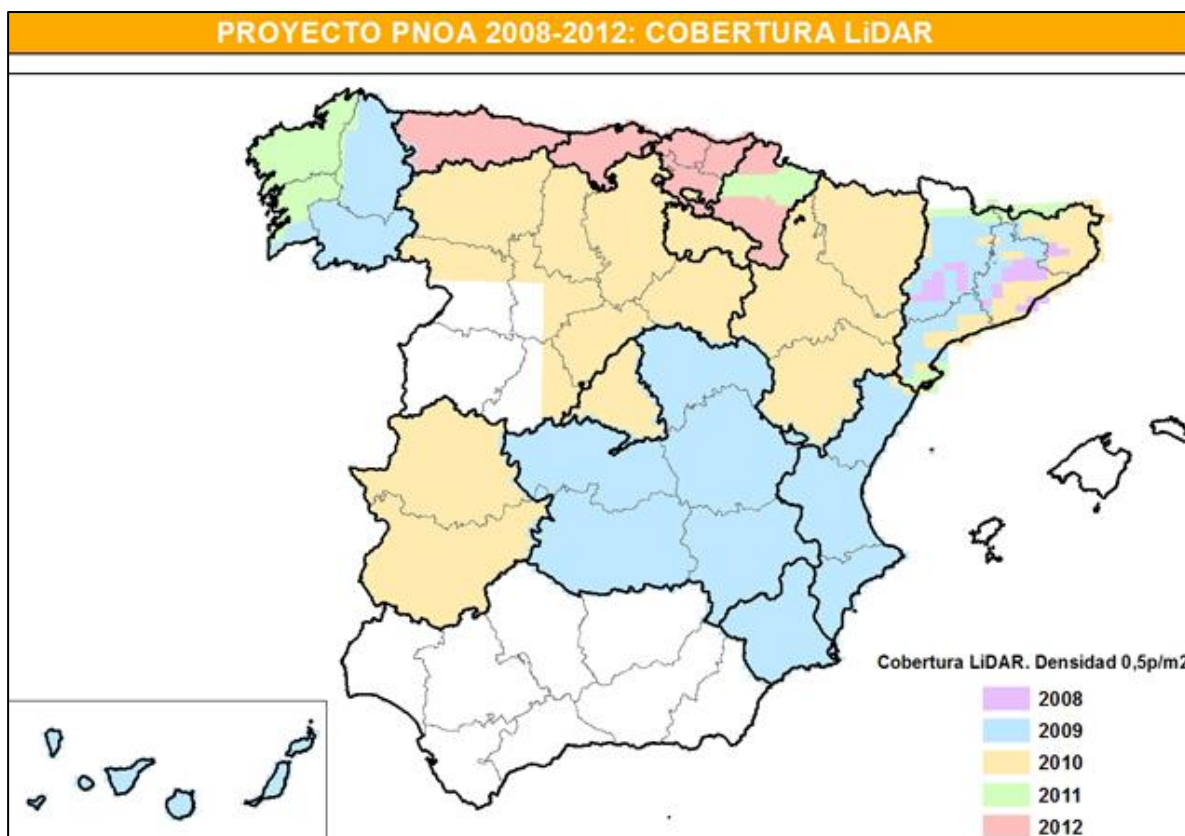


Figura 1. Evolució de la disponibilitat de dades LiDAR a Espanya amb el PNOA. Font: Instituto Geográfico Nacional, 2012.

Estudis previs realitzats amb dades LiDAR permeten preveure que l'aplicació d'aquesta tecnologia a l'àmbit forestal, guanyarà terreny als mètodes tradicionals, en els propers anys; degut, principalment, a l'avantatge de poder mesurar la cota del terreny i la cota superior de la vegetació de forma simultània, fet que permet obtenir directament, l'alçària de la vegetació, entre altres variables. (Fabra *et al*, 2010a).

1.2. JUSTIFICACIÓ

Els aparells de presa de dades a camp d'última tecnologia, principalment sistemes de teledetecció (des d'avió i des de satèl·lit), junt amb les potents eines informàtiques, tant de tractament de la informació cartogràfica, com els programes estadístics de tractament de dades, han fet que l'inventari forestal s'hagi desenvolupat extraordinàriament (Fabra *et al*, 2010a).

Amb l'aparició de la tecnologia de teledetecció LiDAR i la seva aplicació a l'àmbit forestal, els inconvenients dels mètodes tradicionals a l'hora de recollir informació a camp per a una ordenació de forest, es poden veure reduïts considerablement degut a que l'estimació de paràmetres forestals, a partir de dades LiDAR, pot arribar a permetre una reducció de costos i un increment de la precisió.

La disponibilitat de dades LiDAR amb total cobertura de l'Estat Espanyol per part del Ministeri de Foment, dins del PNOA, amb una densitat d'un punt cada dos metres quadrats, converteix a Espanya en el primer país d'Europa amb tota la seva superfície volada amb tecnologia LiDAR i això fa que es pugui convertir en pionera en el desenvolupament d'aplicacions per al sector forestal en vols de baixa densitat de punts (0,5 punts/m²) (Dielmo 3D SI, 2012).

1.3. OBJECTIUS

La producció forestal no és un objectiu prioritari en la gestió però es pretén que amb les actuacions que es puguin programar en un futur, cada vegada sigui més important. Degut a que l'inventari forestal és l'eina de que es disposa actualment per dur a terme les accions de planificació i gestió dels terrenys forestals, es pretén estudiar l'aplicació de la tecnologia LiDAR per la realització d'un inventari forestal a una finca en la província de Tarragona.

L'objectiu principal és la comparació dels paràmetres forestals obtinguts a partir de dades LiDAR, amb els obtinguts a partir de l'inventari forestal tradicional; per poder contrastar fins a quin punt les dades LiDAR facilitades pel PNOA tenen utilitat per l'estimació de les següents variables forestals:

- Densitat de l'arbrat
- Alçada
- FCC (Fracció de Cobertura)

El concepte d'error és un altre aspecte a tenir en compte en aquesta tecnologia, degut a que les mesures amb LiDAR són en continu i no extrapolades des de les parcel·les d'inventari, com és el cas del mètode tradicional. Per exemple, en una ordenació de 1000 hectàrees, de mitjana es fan unes 200 parcel·les d'inventari, és a dir, aproximadament una parcel·la cada 5 hectàrees i en canvi amb LiDAR, s'obtenen un total de mig milió de punts per a aquesta mateixa superfície (Fabra *et al*, 2010a). Un dels objectius d'aquest treball és comprovar en quin cas l'error és més acceptable, en el cas tradicional en que s'obtenen pocs punts i s'extrapola a tota la superfície o en el cas LiDAR en que s'obtenen molts més punts i s'interpolen els resultats.

2. MATERIAL I MÈTODES

2.1. CARACTERÍSTIQUES DE L'ÀREA D'ESTUDI

2.1.1. Localització

La forest en estudi es troba dins la finca La Vall que pertany al terme municipal de Benifallet, dins la comarca del Baix Ebre, a la província de Tarragona (Figura 2). La Vall, amb una superfície forestal de 115,82 ha, està situada a l'extrem més septentrional de la comarca, al límit amb les comarques de la Terra Alta i la Ribera d'Ebre. El terme municipal de Benifallet confronta amb Prat de Comte (W) i el Pinell de Brai (NW), ambdós municipis de la Terra Alta; amb Miravet (N) i Rasquera (NE), de la Ribera d'Ebre. El municipi de Benifallet s'estén a ambdues ribes de l'Ebre, i comprèn la vall del riu, delimitada al SE per les elevacions de les Muntanyes de Cardó, divisòria d'aigües entre l'Ebre i la mar, mentre que per la dreta la vall del riu resta encaixada i tancada per les serres dels Aligars i de Vallplana i els cims de Portell (Figura 3).

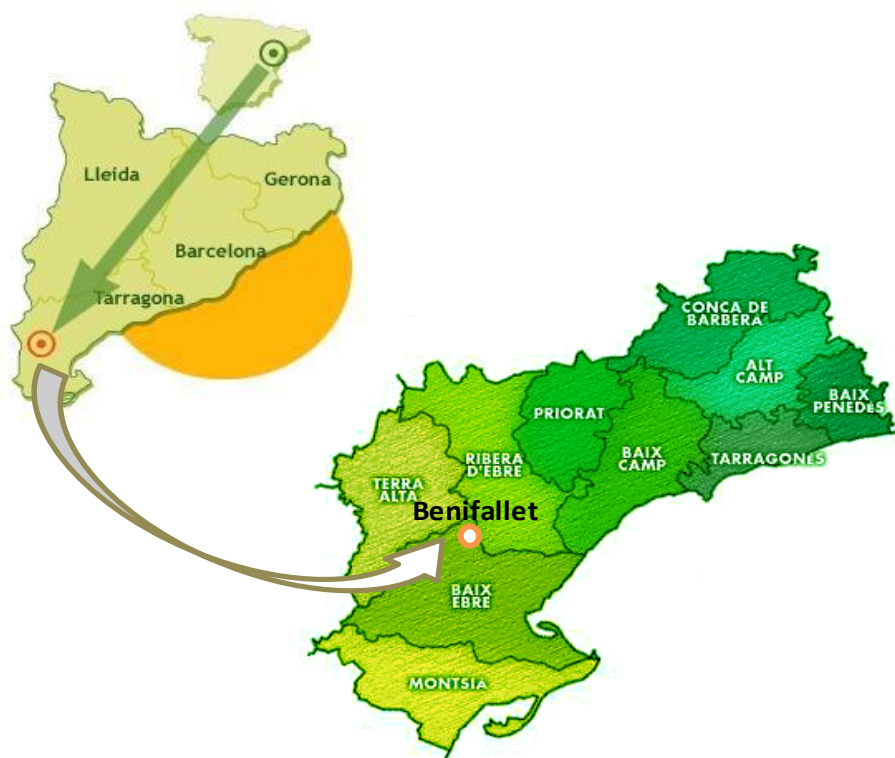


Figura 2. Localització del terme municipal de Benifallet dins la província de Tarragona

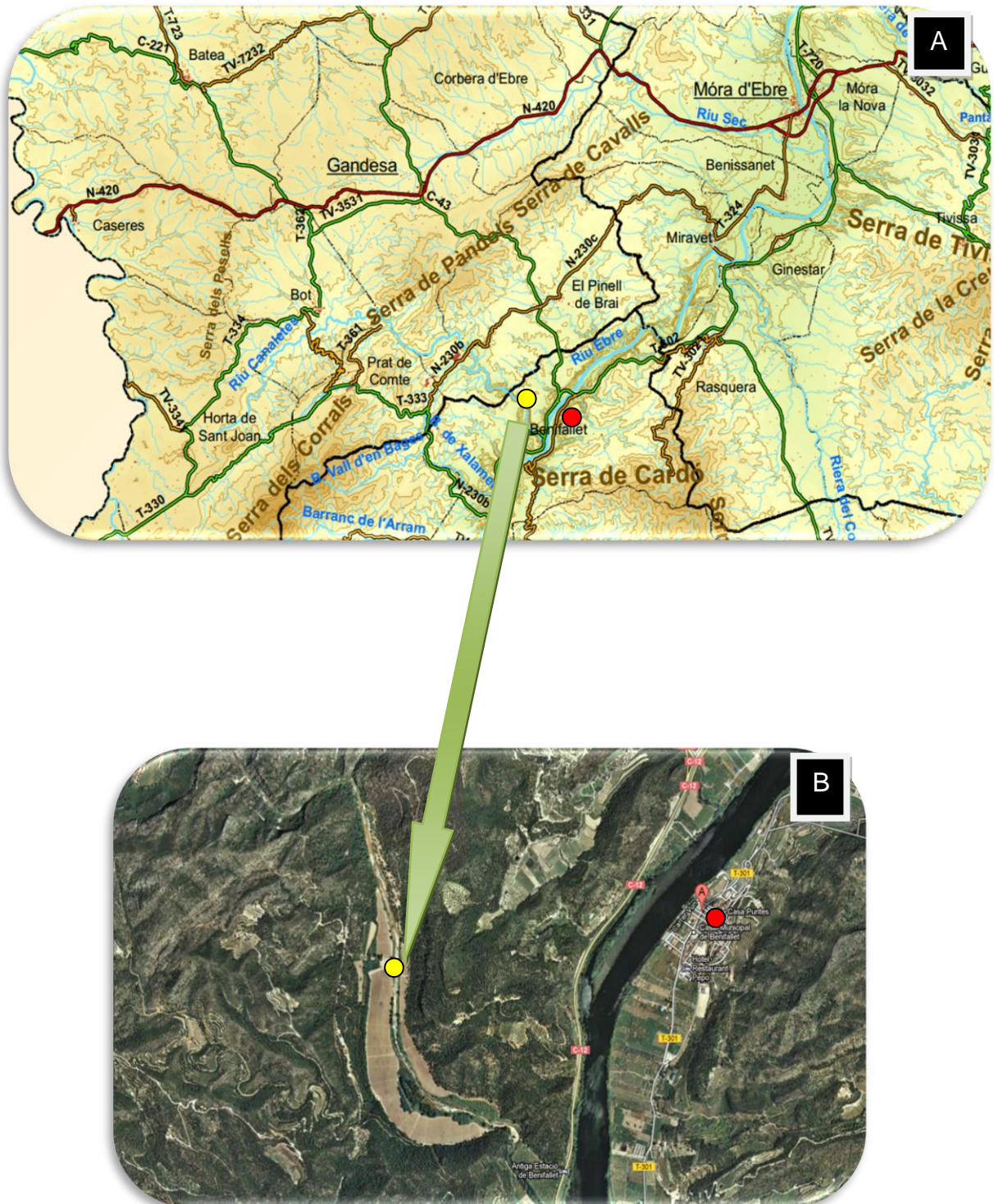


Figura 3. A) Situació de Benifallet (punt vermell) i situació de la finca (punt groc). B) Ortofoto de la finca La Vall.

2.1.2. Descripció de la finca

La finca ocupa una vall tancada amb pendents de moderades a fortes i un ample fons de vall per on transcórrer el riu Canaletes, que desguassa directament a l'Ebre pel sud de Benifallet. La cota màxima és de 201,90 m i la cota mínima de 20 m sobre el nivell del mar. La finca forma part del congost de Canaletes i conté un tram de la Via Verda que transcorre per l'antic traçat de la via del tren de la Vall de Zafán. L'antiga estació de Benifallet, ara rehabilitada i amb serveis d'allotjament i lloguer de bicicletes, es troba ubicada dintre de la finca i destaca com a valor d'ús social. Dintre dels valors ecològics, la zona té les següents qualificacions especials: PEIN (Pla d'Espais d'Interès Natural), ZEPA (Zones d'Especial Protecció per a les Aus) i LIC (Llocs d'Importància Comunitària). Com aprofitaments de la finca destaquen uns 70 panells d'abelles repartits en dos punts diferents de la Vall, fruit d'un acord entre els propietaris i un apicultor de la zona. La presència de les abelles afavoreix a una altra activitat que es desenvolupa dins la finca, ja que una part d'aquesta, la zona més plana i més humida es troba arrendada pel conreu de la síndria.

2.1.3. El clima de la zona

El clima que predomina a la zona és mediterrani, caracteritzat per un dèficit hídric que es fa patent sobretot en èpoques d'estiatge i una irregular distribució de les precipitacions, que sovint produeixen períodes de pluges torrencials. Tot i aquest caràcter mediterrani, aquesta zona que compren el riu Canaletes, presenta una continentalitat més acusada. La barrera natural que constitueix el Massís dels Ports provoca l'aturada de les masses d'aire humides provinents del mar, donant lloc a un clima més sec i un major contrast tèrmic durant l'any, així com també en el transcurs d'una mateixa jornada. L'hivern sol ser fred i sec i no és estrany que es produeixin algunes nevades a les muntanyes del voltant durant els mesos de novembre a febrer.

Les precipitacions recollides durant l'any oscil·len entre 400 i 800 mm. En el repartiment mensual mitjà de les precipitacions per al període històric, representat a la Figura 4, es pot apreciar com els màxims es corresponen amb els mesos de tardor, seguits d'aquells que corresponen a la primavera i els mínims es concentren als mesos d'estiu.

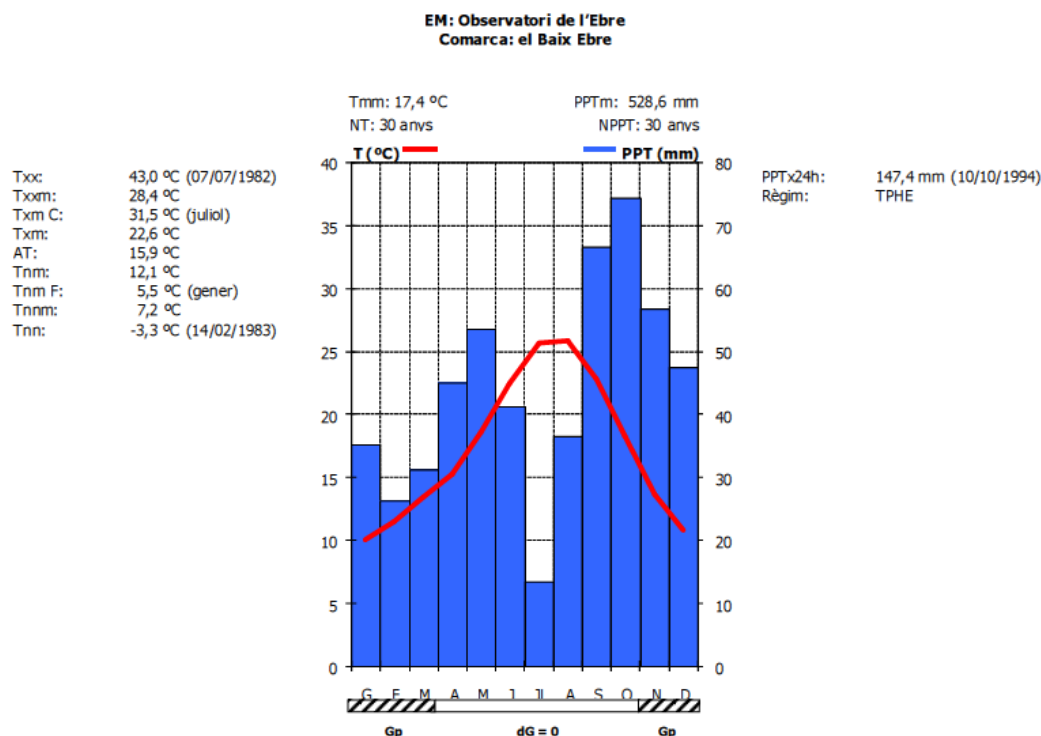


Figura 4. Dades de precipitació i temperatura a la comarca del Baix Ebre en el període 1971-2000. Font: Servei Meteorològic de Catalunya, 2012

Variable	Unitats	Descripció
Tmm	°C	Temperatura mitjana
Txx	°C	Temperatura màxima absoluta
Txxm	°C	Temperatura mitjana de les màximes absolutes
Txm	°C	Temperatura màxima mitjana
Txm C	°C	Temperatura màxima mitjana del mes més càlid
Tnm	°C	Temperatura mínima mitjana
Tnm F	°C	Temperatura mínima mitjana del mes més fred
Tnnm	°C	Temperatura mitjana de les mínimes absolutes
Tnn	°C	Temperatura mínima absoluta
AT	°C	Amplitud tèrmica. Diferència entre la temperatura mitjana (Tmm) dels mesos més càlid i més fred
NT	Anys	Número d'anys de la sèrie climàtica per a la variable temperatura
PPTm	mm	Precipitació mitjana
PPTx24h	mm	Precipitació màxima en 24 hores
Règim		Règim pluviomètric
NPPT	Anys	Número d'anys de la sèrie climàtica per a la variable precipitació
dPPT	Dies	Número mitjà de dies de pluja
dG	Dies	Número mitjà de dies de glaçada
Gs		Període de glaçada segura
Gp		Període de glaçada probable
dG=0		Període sense glaçada
EM		Estació meteorològica

Figura 5. Acrònims de la Figura 4. Font: Servei Meteorològic de Catalunya, 2012

Pel que fa al règim de vents domina el cerç, provinent del nord-oest, la qual cosa porta com a conseqüència un estiu sec i calorós, que pot afavorir els incendis forestals si no es veu acompanyat de precipitacions ocasionals al final de la primavera i inici de l'estiu. A més s'afegeixen els canvis de vent a la tarda-vespre durant aquesta època que poden girar a ponent de forma sobtada. Durant aquestes tardes d'estiu, apareix el garbí, que proporciona una major frescor i que provoca l'aparició d'una capa de núvols densa enganxada a la muntanya coneguda en aquestes terres com la "cella del Port" que indica un temps ventós.

2.1.4. La vegetació

La massa arbrada predominant a la finca és de pi blanc (*Pinus halepensis*), però cal indicar la presència d'altres exemplars com l'olivera (*Olea europaea*) d'antigues plantacions, l'àlber (*Populus alba*) com a representació del bosc de ribera a la part més humida de la finca i el garrofer (*Ceratonia siliqua*).

El sotabosc està compost majoritàriament per llentiscle (*Pistacia lentiscus*), garric (*Quercus coccifera*) i margalló (*Chamaerops humilis*), que sovint formen màquies gairebé impenetrables; en el cas del llentiscle en alguns indrets assoleix dimensions d'arbre amb més de 3 metres d'alçada. Altres arbustos abundants a la forest són el bruc d'hivern (*Erica multiflora*), l'aladern (*Rhamnus alaternus*) i el romaní (*Rosmarinus officinalis*); menys nombrosos serien la farigola (*Thymus vulgaris*), el ginebró (*Juniperus communis*) i alguna esparreguera (*Asparagus acutifolius*). Quan ens acostem al riu ens poden trobar amb esbarzers (*Rubus ulmifolius*) i altres rosàcies. A la Figura 6 s'observa una imatge de la finca.



Figura 6. Bosc de pi blanc amb gran varietat de sotabosc. Font: elaboració pròpia

2.2. METODOLOGIA DEL PROJECTE

L'estudi compren la comparació de les dades obtingudes mitjançant l'inventari forestal tradicional amb les dades obtingudes amb la tecnologia LiDAR. Els paràmetres forestals que es volen comparar són:

- Densitat. Nombre de peus per unitat de superfície (Serrada, 2008).
- Alçada. Mesura entre la base d'un arbre i la seva copa (Delgado, 2008).
- Fracció de cabuda coberta (FCC). Índex d'espessor que quantifica la part de la superfície coberta per la projecció de les copes de l'arbrat (Serrada, 2008).

Per tal d'explicar amb claredat la metodologia aplicada a aquest treball cal ressaltar, en primer lloc, que les dades de les variables dasomètriques s'obtenen mitjançant dos mètodes diferents, el tradicional i el de la tecnologia LiDAR. En segon lloc, la comparació entre els dos mètodes es realitza a nivell de dos tipus d'unitats de superfície, les parcel·les i els estrats.

Per obtenir les variables dasomètriques de cada parcel·la es realitza l'inventari sobre el terreny. A continuació es localitza la situació exacta de cada parcel·la sobre el plànol i després s'obtenen les variables dasomètriques mesurades amb LiDAR a nivell parcel·la. Posteriorment es realitza l'estudi de comparació de les variables obtingudes amb cada mètode, per observar la variabilitat i informació vàlida que ens aporten i poder treure conclusions sobre la seva utilitat en l'obtenció de paràmetres forestals. Amb aquest procediment s'haurà comparat les dades de les parcel·les. Per comparar les dades a nivell de tota la finca, cal extrapolar les dades obtingudes amb l'inventari tradicional, a la superfície de tota la finca que prèviament s'ha dividit en estrats.

A partir dels software Miramon (CREAF, Barcelona, Espanya), LIFOR (CPF, Barcelona, Espanya) DielmoOpenLidar (Dielmo3D, València, Espanya) i Microsoft Excel 2010 (Microsoft, WA, EE.UU.) s'han obtingut les dades, els mapes i les taules de l'estudi.

En els apartats següents es desenvolupa una descripció del funcionament de cada mètode i la metodologia aplicada en cada cas.

2.3. L'INVENTARI FORESTAL TRADICIONAL

L'extensió i la variabilitat dels terrenys forestals fa que sigui imprescindible dividir-los en parts més petites i homogènies per avaluar quantitativament les seves existències. De l'estudi d'aquestes parts es pot obtenir un coneixement més exacte i precís del contingut d'una finca, fet que permet especificar objectius d'ordenació i planificar les actuacions per a cadascuna de les parts d'acord amb les dades recollides. En els apartats següents es pot veure una descripció del mètode que s'ha fet servir per la realització de l'inventari forestal a la finca La Vall i que és una adaptació del mètode proposat per l'Àrea de Planificació del CPF (CPF, 2010). Aquest mètode consisteix en seleccionar un número de parcel·les representatives de tota la superfície a inventariar i mesurar les dades necessàries de tots els arbres continguts dintre d'aquestes parcel·les, el resultat obtingut és a nivell parcel·la. A partir d'aquestes dades obtingudes a camp i mitjançant càlculs estadístics, s'obtenen uns resultats que es poden extrapolar a la superfície total de la finca estudiada, el resultat obtingut és a nivell estrat i posteriorment a tota la finca.

2.3.1. Divisió inventarial

Abans d'anar a camp a prendre dades es fa una delimitació sobre el plànol de la superfície forestal objecte d'ordenació, diferenciant clarament les superfícies dedicades a l'ús agrícola, a les edificacions o altres usos diferents dels forestals. Per aquesta primera aproximació es fan servir els ortofotomapes, ja que permeten delimitar superfícies segons el seu ús mitjançant fotointerpretació i comprovació posterior a camp.

Una vegada coneguda i delimitada la zona forestal cal diferenciar les zones arbrades de les zones desproveïdes d'arbrat, sempre que aquestes superfícies siguin de prou entitat. En els terrenys desproveïts d'arbrat, com la zona de conreu o la ribera del riu, no s'han fet parcel·les d'inventari i encara que siguin objecte d'ordenació en un PTMGF, manquen d'interès per al present treball.

El següent pas és dividir la gran massa arbrada en estrats vegetals, que són les unitats de vegetació amb característiques comunes com l'espècie arbòria, l'estructura vegetal, la densitat o el volum de fusta.

2.3.1.1. Estratificació de la massa arbrada

Degut a l'heterogeneïtat que presenta una massa arbrada, abans de la realització de l'inventari cal dividir-la en parts més petites i homogènies. Aquest procés, anomenat estratificació, serveix per conèixer més detalladament les característiques i les particularitats del conjunt de la massa.

L'estratificació ha de correspondre, com a mínim, amb les unitats de vegetació, que són les unitats homogènies en composició d'espècies i que són fàcils d'identificar mitjançant fotointerpretació. Posteriorment, amb observacions a camp, s'acaben d'ajustar aquestes unitats de vegetació així com valorar altres característiques que no són fàcils de fotointerpretar, com és el cas de la qualitat i la capacitat productiva de la massa arbrada.

Dins del bosc les fronteres no solen ser mai clares, sinó difoses, de manera que no hi ha un criteri clar a l'hora de fer passar una línia de separació. Els criteris que s'han fet servir a l'hora de definir els estrats, ha sigut els indicats pel CPF (CPF, 2010) i són els següents:

- Característiques fisiogràfiques (camins, rius, camps de conreu, edificacions, etc).
- Composició específica i ocupació per espècies (segons densitats i presència d'espècies arbòries).
- Estat de la massa (mida dels arbres i volum de fusta)

Seguint aquests criteris i mitjançant l'observació d'ortofotomapes, en un primer moment es van definir 3 estrats a la finca. Posteriorment, amb l'observació directa a camp, es van definir tres estrats més, per tant, el nombre total d'estrats que es van definir és de 6 i es descriuen a continuació:

Estrat I: Estrat amb pi blanc i presència d'oliveres, amb densitats baixes i diàmetres petits.

Estrat II: Estrat de pi blanc i presència d'oliveres i garrofers amb densitats i diàmetres mitjans.

Estrat III: Estrat amb pi blanc més dens i presència d'algun garrofer; els peus tenen diàmetres mitjans.

Estrat IV: Estrat amb una densitat elevada de pi blanc i peus amb grans diàmetres, és a dir, amb força volum de fusta.

Estrat V: Estrat d'álbers molt dens, diàmetres petits i mateixa estructura d'alçada. Seria el cas en que l'estrat coincideix amb la unitat de vegetació.

Estrat VI: Estrat variat de pi blanc, olivera i garrofer de grans diàmetres i baixa densitat.

2.3.1.2. Característiques de les parcel·les

A l'hora de triar sobre el terreny la situació de les parcel·les s'han tingut en compte els següents criteris bàsics:

- **Estabilitat:** L'estabilitat de les parcel·les s'aconsegueix prenent com a límits línies de caràcter permanent, com ara accidents geogràfics, carenes, rieres, camins, etc.
- **Homogeneïtat:** Les característiques físiques del medi (altitud, pendent, exposició, profunditat dels sòl, etc.) han de ser homogènies per evitar diferències en la capacitat productiva dins d'una mateixa parcel·la. Aquesta homogeneïtat s'ha de produir en les característiques de la vegetació o massa forestal, en allò que fa referència a espècies, edat i densitat d'arbrat.

La realització de l'inventari permet conèixer les característiques físiques i els paràmetres forestals a cadascuna de les parcel·les estudiades.

La forma de cada parcel·la per fer l'inventari és circular i els motius que justifiquen aquesta forma es descriuen a continuació:

- El nombre d'arbres dubtosos que es troben en el límit de la parcel·la és menor que en altres formes, ja que a igualtat de superfície, el cercle és la figura de menor perímetre.
- La simetria radial del cercle fa que no tingui direccions privilegiades, el que li dona una forma objectiva.
- El replanteig de la parcel·la és més ràpid i senzill i la seva identificació en inventaris successius requereix tan sols trobar el seu centre.

El tipus de parcel·la que s'ha fet servir és de radi 10 metres.

2.3.2. Intensitat del mostreig

La intensitat de mostreig es defineix com el nombre de parcel·les que cal mesurar per estrat de vegetació objecte d'inventari (CPF, 2010). La intensitat de mostreig s'ha d'ajustar a la precisió o l'error amb que es volen obtenir els resultats de l'inventari, per tant, cal partir d'un error acceptable i intentar realitzar el mínim possible de parcel·les amb el condicionant de no superar aquest error decidit a priori.

L'error admès depèn de l'interès econòmic de la massa forestal. Segons el CPF l'error admès és del $\pm 20\%$ per a boscos amb objectiu principalment productor, dels quals s'espera obtenir rendiment econòmic amb la venda de fusta, suro o altres productes forestals. I del $\pm 25\%$ per a boscos amb altres objectius, on la producció no és la prioritat. En aquest grup estarien els boscos amb objectiu protector, el que implica una gestió diferent ja que les actuacions d'aprofitament forestal passen a ser secundàries o inexistents i els únics productes forestals que s'obtenen són derivats de l'execució d'actuacions de millora de la massa forestal.

El bosc de la finca en estudi s'ha considerat del tipus protector, ja que l'interès dels propietaris és el manteniment del bosc en les millors condicions possibles per evitar incendis, amb actuacions de neteja del sotabosc; evitar l'erosió del sòl, afavorint un arbrat adult que protegeixi el sòl i mantenir la dominància del pi blanc i alhora permetre el desenvolupament de les espècies minoritàries, com els garrofers i les oliveres presents a la finca.

Per tant, tenint en compte aquestes consideracions, l'error admès en els càlculs de l'inventari no pot passar en cap cas del 25% .

Tant la intensitat del mostreig com la distribució de les parcel·les sobre el terreny s'han fet de forma aleatòria i per estrats. En un primer moment es van definir, en termes de densitat, tres estrats sobre l'ortofotomapa i posteriorment a camp, observant les diferents espècies, alçades i volums de fusta es van definir tres estrats més.

La intensitat de mostreig a cada estrat ha estat la següent:

- **Estrat I:** 5 parcel·les.
- **Estrat II:** 10 parcel·les.
- **Estrat III:** 5 parcel·les.
- **Estrat IV:** 2 parcel·les.
- **Estrat V:** 1 parcel·la.
- **Estrat VI:** 1 parcel·la.

2.3.3. Inventari forestal

Per fer l'inventari forestal es va anar a camp per prendre mesures sobre el terreny dels diferents paràmetres. A més dels aparells de mesura, que es descriuen a l'apartat següent, és imprescindible portar una fitxa de camp on es van anotant les dades observades a cada parcel·la d'inventari. La fitxa d'inventari que es va fer servir, correspon al model proporcionat pel CPF en el manual de redacció d'un PTGMF (CPF, 2010) i que es pot veure a la Figura 7.

La metodologia emprada per dissenyar l'inventari forestal, ha estat un mostreig aleatori de parcel·les circulars de superfície fixa i distribuïdes pels diferents estrats identificats a la finca. Es tracta de parcel·les de radi 10 metres i a cadascuna d'elles s'han mesurat tots els peus amb diàmetre igual o superior a 7,5 cm (sempre en sentit perpendicular a la recta que uneix el centre de la parcel·la amb l'eix axial del peu a mesurar) i a una alçada d'1,30 m del terra. També s'han mesurat altres dades com són el nombre de peus menors (aquells amb un diàmetre inferior a 7.5 cm), així com la fracció de cabuda coberta tant de l'estrat arbori com de l'estrat arbustiu, identificant les espècies majoritàries. També a cada parcel·la s'ha agafat l'alçària de 3 arbres tipus, fent-los coincidir amb els més propers al centre de la parcel·la i amb els següents requisits:

- Ser peus inventariables
- Pertànyer a l'espècie principal (*Pinus halepensis*)
- No ser peus dominats
- Presentar un fust amb un eix axial vertical.

Fitxa de camp del PTGMF															
1- Informació general		Codi parcel·la	UTM 31N X			Y									
Nom de la finca					Data mostreig			/ / 20							
Unitat de vegetació		UA				Temps de desplaçament			:						
Radi de mostreig (m)					Temps de mostreig			:							
2- Topografia		Altitud (m)				Pendent (%)				Orientació (°)					
3- Sòl		Tipus de roca				Rocositat (%)				Erosió					
4- Vegetació		Fcc (%)													
5- Estrats de vegetació															
Estrat herbaci		Fcc (%)				Espècies									
Estrat arbusti		Fcc (%)				Hm (m)									
Per espècies															
Estrat arbori		Fcc (%)				Composició específica			Distribució espacial de la massa						
Per espècies															
						Estat fitosanitari			Regeneració		Danys regenerat				
Espècie	Rec (%)	Hdom (m)	TC	AC	DE	Agent	Importància	Element	Origen	Valoració	Agent	Importància			
1-															
2-															
3-															
4-															
5-															
TC = Tipus de capçada AC = Aspecte del canó DE = Distribució espacial específica o repartiment															
Arbres mesurats						(*) Suro		(*) PES							
Espècie	DN (cm)	H (m)	V	I-10(mm)	Edat	Espècie	DN (cm)	H (m)	V	I-10(mm)	Edat				
1-						16-									
2-						17-									
3-						18-									
4-						19-									
5-						20-									
6-						21-									
7-						22-									
8-						23-									
9-						24-									
10-						25-									
11-						26-									
12-						27-									
13-						28-									
14-						29-									
15-						30-									
(*) Suro: Gruix d'escorça, (*) PES: Paràmetres Especials Surera															
Paràmetres per a la sureda												Total			
Temps de l'última pela															
Alçada de la pela (m)															
Peus Menors															
Nombre de Soques															
Observacions:															

Figura 7. Imatge de la fitxa d'inventari que es va utilitzar en les parcel·les. (CPF, 2010)

2.3.3.1. Aparells de mesura

A continuació es fa referència als instruments de mesura que s'han fet servir a camp per la realització de l'inventari:

· **FORCÍPULA:** És un instrument per mesurar els diàmetres dels arbres de forma ràpida i precisa. Es tracta d'una barra dividida en centímetres i mil·límetres amb dues puntes, una fixe i l'altre mòbil, aquesta última és la que donarà la mida del diàmetre (Figura 9). La forcípula que s'ha fet servir a l'inventari és una WALDFIX de perfil pla metàl·lic.

· **LOCALITZADOR GPS (Sistema de Posicionament Global):** És molt útil per la localització terrestre ja que permet posicionar-se sobre el terreny amb error d'entre 5 i 10 m. Bàsicament s'utilitza per a la situació a cada parcel·la de mostreig. El GPS que s'ha fet servir per l'inventari és del tipus submètric, model GeoExplorer XH 6000.Series (Trimble, Sunnyvale, California, EE.UU (Figura 9).

· **HIPSÒMETRE-DISTANCIÒMETRE:** Es tracta d'un sistema que utilitza senyals ultrasòniques per a mesurar alçades, distàncies, angles, pendents i temperatura actual de l'aire. El model que s'ha fet servir per l'inventari és el Vèrtex IV (Haglöf, Alemanya) i s'ha utilitzat conjuntament amb el receptor-emissor T3 (Figura 9). Funciona per ultrasons i permet prendre mesures precises sense que calgui una visió neta d'obstacles. Resulta molt adequat en parcel·les circulars ja que l'emissor pot realitzar les mesures des del centre de la parcel·la i en un angle de 360°. L'aparell dóna distàncies en la horitzontal, això vol dir que fa correccions automàtiques de la distància segons el pendent, *in situ*, sobre el terreny, de tal manera que no cal fer la correcció del pendent de la superfície de la parcel·la posteriorment. També dóna directament l'alçària de l'arbre coneixent la distància i dos angles, el de la base i el de la part culminant de la capçada.

· **DENSITÒMETRE:** Aparell que mesura la fracció de cabuda coberta. Ofereix una visió perpendicular al terra delimitada per una circumferència de 10 cm com es pot veure Figura 8. Al realitzar una observació a través d'aquesta circumferència, es pot observar la vegetació que ocupa la superfície observada, donant una valor de 1 si hi ha presència de vegetació i de 0 si no n'hi ha. El quocient entre el nombre de mesures positives (1) i negatives (0) multiplicat per 100, dóna el percentatge de fracció de cabuda coberta (FCC) (Figura 9).



Figura 8. Imatge de la visió a través del densitòmetre (Ruiz, 2009)



Figura 9. Imatges dels aparells de mesura per realitzar l'inventari. A) forcípula, B) distànciòmetre, C) GPS, D) densitòmetre. Font: elaboració pròpia.

2.3.3.2. Variables dasomètriques mesurades a camp

L'inventari es fa en el mes de maig del 2012 per obtenir les variables que caracteritzen la massa forestal. Les variables mesurades a camp són la fracció de cabuda coberta, la densitat, el diàmetre i l'alçada.

A continuació es fa una descripció de cada variable així com la metodologia utilitzada per mesurar-les.

Fracció de cabuda coberta (FFC): És el percentatge de la superfície del sòl ocupada per les capçades de l'estrat arbori. Aquest valor no pot ser superior al 100%. S'obté amb l'observació directe a camp, mitjançant un densitòmetre, i es pren nota a la fitxa de camp. En el moment de fer l'inventari es van anotar tant la FCC de l'estrat arbori com de l'estrat arbustiu.

Densitat (d): Fa referència al nombre de peus per hectàrea. Es mesura mitjançant recompte directe d'arbres a partir de 7,5 cm de diàmetre normal (inventariables) per parcel·la. Es mesura en peus per hectàrea (peus/ha).

Alçada (H): S'ha mesurat l'alçada dels 3 individus més representatius dins de cada parcel·la. Per realitzar la mesura s'ha utilitzat l'hipsòmetre-distanciòmetre, mesurant la lectura de l'alçada dels tres peus més propers al centre de la parcel·la. Es mesura en metres.

Diàmetre (D): Mitjançant la forcípula i es mesura el diàmetre a 1,30 m del terra. També es pren nota de tots els peus amb una diàmetre igual o superior a 7,5 cm continguts dintre de cada parcel·la. Es mesura en centímetres. A la Figura 10 es pot veure una imatge en el moment de prendre mides dels diàmetres en la finca de l'estudi.



Figura 10. Prenent mides de diàmetres amb forcípula . Font: elaboració pròpia.

Àrea basimètrica (AB): És la suma de les seccions transversals dels troncs dels arbres a 1,30 m del sòl en una hectàrea. Es mesura en metres quadrats per hectàrea (m^2/ha). Aquesta variable no és una de les variables directes que s'obtenen a l'inventari, es tracta d'un paràmetre que es calcula a partir del diàmetre i és la variable que es fa servir per avaluar l'error comès a l'inventari i conèixer així si la intensitat de mostreig ha estat correcta.

2.3.3.3. Càlcul de l'àrea basimètrica i altres paràmetres

Amb les dades agafades a camp es calcula l'àrea basimètrica per veure que la intensitat ha sigut la correcta amb la comprovació d'errors.

Els càlculs de l'**àrea basimètrica** (AB) es realitzen amb l'equació 1.

$$\boxed{AB = \frac{\pi/4 \sum D_i^2}{A_p}} \quad (\text{equació 1})$$

On: D_i = Diàmetre mesurat a 1.3 m de cada arbre d'una parcel·la (cm)

A_p = Àrea de la superfície de cada parcel·la (m²)

AB = Àrea basimètrica (m²/ha)

El **coeficient de variació** (CV) es defineix com el quocient entre la desviació típica (S) de la variable estudiada i la mitjana aritmètica de la mateixa variable. (APCPF *et al*, 2010). Es calcula amb l'equació 3.

$$\boxed{CV = \frac{S}{\bar{X}}} \quad (\text{equació 3})$$

On: S = desviació típica

\bar{X} = mitjana aritmètica

CV = Coeficient de variació

El càlcul de la desviació típica (S) i de la mitjana aritmètica (\bar{X}) es fa amb les equacions 4 i 5.

$$\boxed{S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}} \quad (\text{equació 4})$$

$$\boxed{\bar{X} = \frac{\sum x_i}{n}} \quad (\text{equació 5})$$

On: x_i = i-èssim valor mesurat d'àrea basimètrica

n = nombre de parcel·les

El processat de les dades obtingudes a camp s'ha realitzat amb el software LIFOR Edició Catalunya (Figura 11). Aquest programari està dissenyat per l'elaboració i el processament de dades d'inventaris forestals. Aquest software lliure el facilita el CPF al web de la Generalitat de Catalunya (www20.gencat.cat).

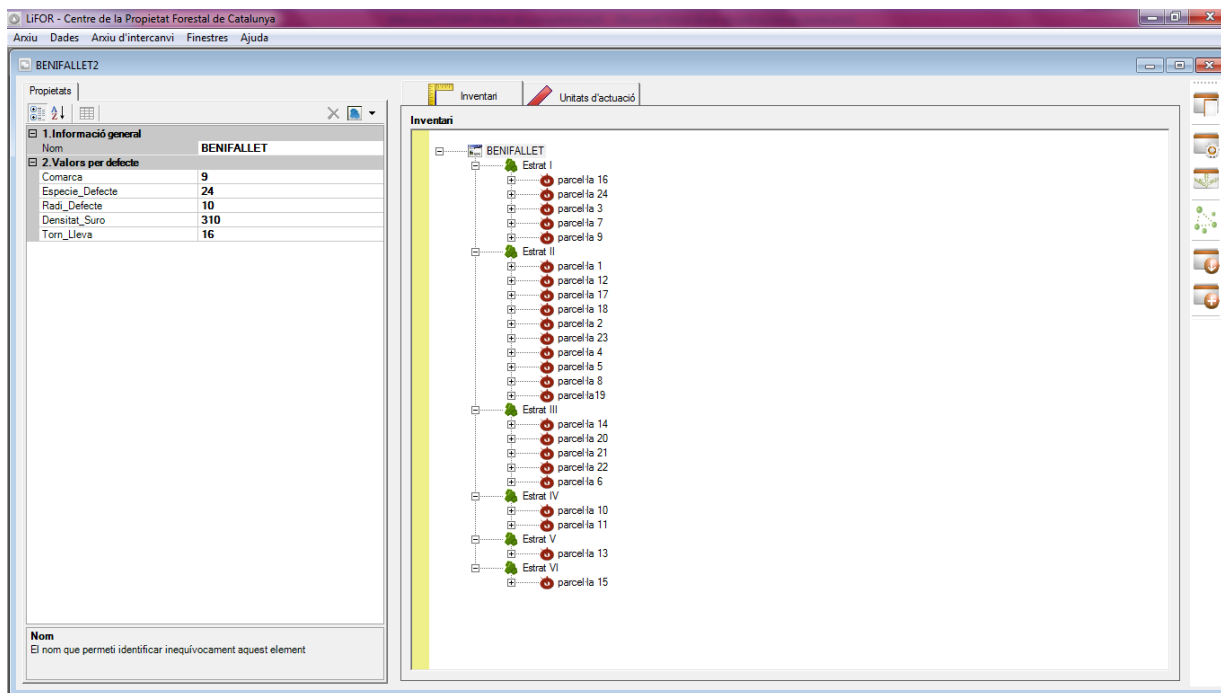


Figura 11. Captura de l'aplicació LIFOR on es veu l'estructura de l'inventari amb els diferents estrats i les seves parcel·les. Font: Elaboració pròpia.

Amb el processat de les dades mesurades a camp s'ha obtingut la densitat, l'àrea basimètrica, el diàmetre mitjà quadràtic i l'alçada mitjana que es descriuen a continuació.

El **diàmetre mitjà quadràtic** (Dg), es defineix com el diàmetre que li correspon a l'arbre d'àrea basimètrica mitjana (CPF, 2010). És un paràmetre força representatiu de la massa i serveix per estimar l'alçada mitjana aritmètica. Per calcular-ho s'utilitza l'equació 6.

$$Dg = 2 \cdot \sqrt{\frac{AB}{\pi \cdot d}} \quad (\text{equació 6})$$

On: AB= Àrea basimètrica (m²/ha)

d= Densitat (peus/ha)

Dg= Diàmetre mitjà quadràtic (m)

La **classe diamètrica** (CD) és un interval que conté diàmetres, de 5 en 5 centímetres, que es tracten com a una unitat. Així la classe diamètrica CD15, conté els diàmetres compresos entre 10 i 15 cm. És útil per calcular l'àrea basimètrica a cada estrat.

L'**alçada mitjana aritmètica** (Hm) és la que correspon al peu de diàmetre igual al diàmetre mitjà quadràtic (CPF, 2010). Amb les dades d'alçada mitjana (mesurada a camp) i el nombre de peus per classe diamètrica, es calcula l'alçada mitjana aritmètica mitjançant l'equació 7. En els estrats on hi ha més d'una espècie d'arbre, només s'ha fet la mesura de l'espècie dominant, que en aquest cas és el *Pinus halepensis*, excepte a l'estrat III on l'espècie dominant és el *Populus alba*.

$$Hm = \frac{\sum_{k=1}^r n_k \cdot H_k}{\sum_{k=1}^r n_k} \quad (\text{Equació 7})$$

On: r = nombre de classes diamètriques presents a cada estrat.

n_k = nombre de peus de la classe diamètrica k

H_k = alçada mitjana de la classe diamètrica k (m)

Hm = alçada mitjana aritmètica (m)

2.4. METODOLOGIA LIDAR

2.4.1. Generalitats de la tecnologia LiDAR

El LiDAR és un sistema que permet obtenir un núvol de punts de la superfície del terreny, mitjançant un escàner làser aerotransportat (ALS), col·locat en un mitjà aeri com pot ser un avió o un helicòpter. Per poder realitzar aquest escaneig es combinen dos moviments. Un longitudinal, que ve donat per la trajectòria de l'avió i altre transversal, que s'obté mitjançant un mirall mòbil que desvia el feix de llum làser emet per l'escàner (INEGI, 2012).

Per obtenir les coordenades del núvol de punts es necessita conèixer la posició del sensor i de l'angle del mirall en cada moment. Per això, el sistema es recolza en un sistema localitzador GPS diferencial i un sistema de navegació inercial o IMU (Unitat de Mesurament Inercial).

El GPS permet obtenir la posició exacta de l'avió durant el vol. Per augmentar la precisió en el posicionament de l'instrument es fa servir un localitzador GPS diferencial en terra amb unes coordenades conegudes.

L'IMU dóna informació dels girs i de la trajectòria de l'avió, mesurant l'orientació exacta del sensor. Aquest sistema mesura els angles amb una precisió de 0.001 graus (Dielmo 3D SL, 2012) fet que permet compensar els moviments bruscs que pateix el sensor a bord de l'avió, i calcula a cada moment les coordenades exactes del punt que s'està mesurant sobre el terreny. L'IMU és capaç de detectar les variacions angulars de l'avió. Aquests angles de navegació són el de direcció (Yaw), el d'elevació (Pitch) i l'angle de guinyada (Roll). A la Figura 12 es mostra un exemple dels dispositius necessaris per a la utilització de la tecnologia LiDAR (Andersen *et al*, 2006).

Amb la combinació de tota aquesta informació (distància mesurada amb el làser, angle del mirall que realitza l'escaneig i posició exacta del GPS) s'obté el mesurament de l'altura del terreny i de la vegetació.

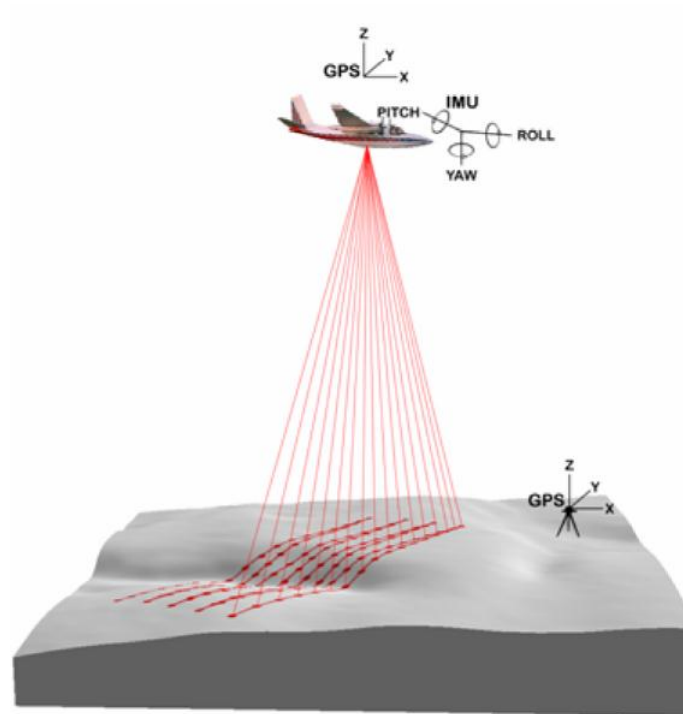


Figura 12. Dispositius per l'adquisició de dades amb sensor làser aerotransportat. (Davara *et al*, 2008)

El funcionament del LiDAR consisteix en mesurar el temps que transcorre entre l'emissió d'un pols làser i el seu retorn al sensor, després d'haver estat reflectit per algun element de la superfície terrestre (Estornell, J., 2011).

Un cop el raig làser arriba a una superfície es comporta de forma diferent segons les característiques de l'objecte que trobi:

- En una superfície sòlida (edificis, sòl, etc.) el raig es reflexa sense cap problema i torna a l'avió.
- Si troba aigua, el raig és absorbit ràpidament i no torna a l'avió, llavors no registra cap dada.
- Quan troba vegetació, com que es tracta d'una superfície no sòlida, una part del raig torna a l'avió, en el moment que troba una part de l'arbre i altre part del raig continua fins arribar a terra. És a dir, que d'un mateix raig tenim la mesura del primer i l'últim punt de superfície sòlida que troba el làser.

Una de les característiques distintives dels retorns en zones de vegetació, com es pot veure a la Figura 13, és que en aquestes els retorns es poden produir a diferents nivells, sent possible que l'últim retorn es produeixi a nivell de la superfície del terreny (INEGI, 2012).

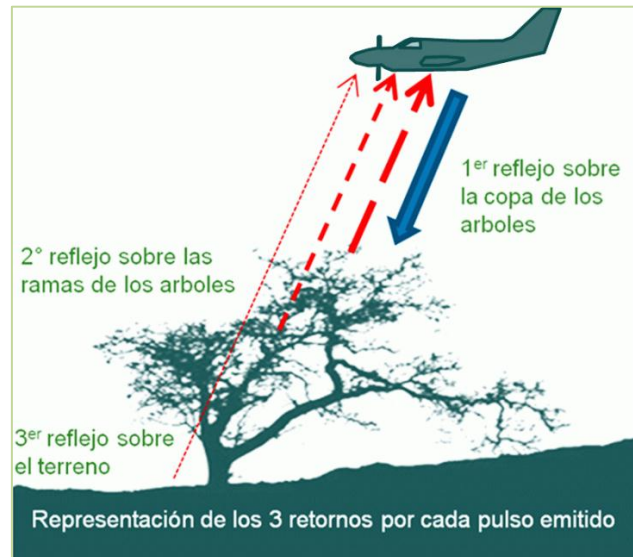


Figura 13. Comportament del raig làser sobre les superfícies vegetals (INEGI, 2012)

El fet que d'un mateix raig làser es puguin mesurar el primer pols i l'últim, permet la recollida d'informació a diferents alçades. De les primeres intercepcions en la vegetació s'obté el model digital MDS (Model Digital de Superfície) i de les últimes, que són les que arriben a la superfície del terreny, s'obté un altre model digital, el MDT (Model Digital del Terreny). Un MDT és un conjunt ordenat de números que representa la distribució espacial de característiques del terreny (Estornell, J., 2011). Amb la diferència dels dos models digitals (MDS - MDT) es genera el MDC (Model Digital de Cobertura vegetal). Aquesta capa cartogràfica és la que ens facilita les dades necessàries per fer la comparació amb l'inventari tradicional, és la capa que proporciona l'alçada de la vegetació. A la Figura 14 es poden observar imatges dels models digitals obtinguts a la finca en estudi.

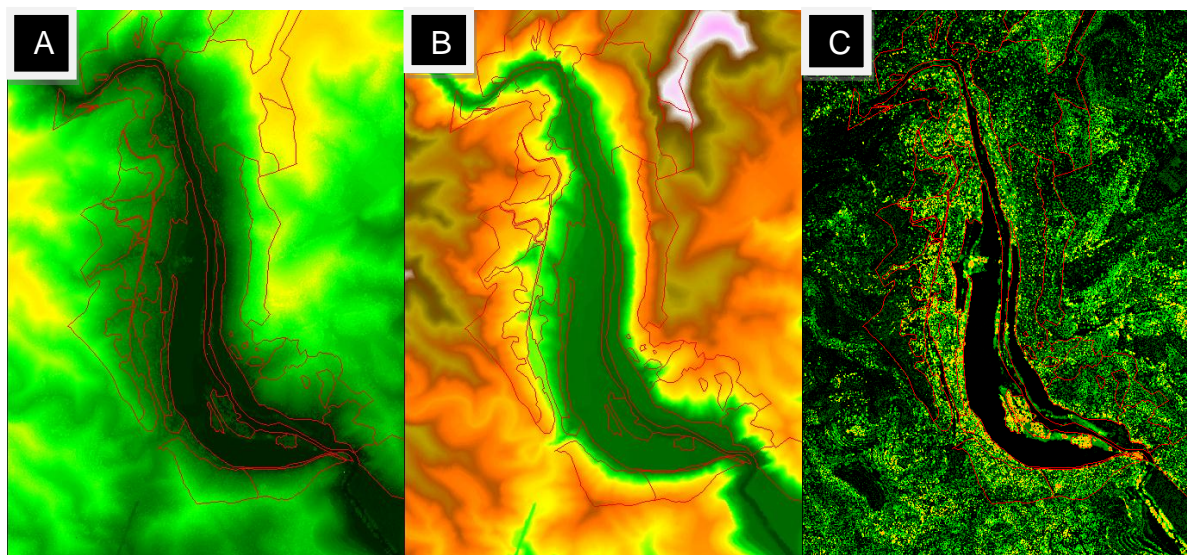


Figura 14. Tres imatges de la finca en estudi. Les línies vermelles són els límits dels estrats. A) MDS B) MDT C) MDC, resultat de restar MDS-MDT. Font: elaboració pròpia.

2.4.2. Metodologia i tractament de les dades LiDAR

Les dades del vol LiDAR (Taula 1) s'han obtingut del PNOA, facilitades pel Ministeri de Foment de forma lliure i gratuïta.

Taula 1. Característiques del vol LiDAR

Data del vol	05/05/2009
Freqüència mínima d'escaneig	70 Hz
Densitat de punts	0,5 punts/m ²
Mínim retorn per pols	4
Sistema de referència dels punts UTM	fus31 sobre ED50

Una vegada obtingudes les dades LiDAR cal fer el processat d'aquestes. El procés a seguir parteix de les dades en format LAS. Aquest format és un arxiu binari que manté tota la informació procedent del sistema LiDAR i la conserva segons la pròpia naturalesa de les dades i del sistema de captura (Cerrillo, A., 2010).

Per aquest treball l'empresa Dielmo 3D S.L. ha facilitat un programari propi DielmoOpenLiDAR (Dielmo 3D SL, València) en base a gvSIG (programari sobre sistemes d'informació geogràfica) que consisteix en una sèrie d'algoritmes per obtenir el MDT i el MDS, així com diversos paràmetres silvícoles, a partir dels quals es poden caracteritzar les masses forestals, com es realitza a partir de dades obtingudes d'un inventari tradicional.

El MDT s'obté interpolant els punts de l'últim pols, eliminant els punts que no pertanyent al terreny (Garcia, 2009). Per veure un exemple, a la imatge del MDT de la Figura 15 s'observa que s'han eliminat els punts corresponents a edificis, vegetació i altres objectes que no pertanyen al terreny.

A continuació es realitza el MDS, que s'obté interpolant els punts del primer pols, és a dir, a partir de les primeres intercepcions en la vegetació (Garcia, J.C., 2009). A diferència del MDT en aquest cas, es poden distingir les altures de la vegetació, ponts, etc. (Figura 15).



Figura 15. A) Model Digital de Superfície (MDS), B) Model Digital del Terreny (MDT). (Garcia, 2009)

2.4.2.1. Determinació de la densitat d'arbrat

La densitat és un paràmetre rellevant a partir del qual es poden deduir un gran nombre d'índexs dasomètrics de gran interès per l'anàlisi forestal de la massa (Reyna *et al*, 2010). La seva determinació a camp és relativament senzilla si s'assumeix una homogeneïtat a la massa, contràriament, la seva estimació mitjançant dades LiDAR pot resultar més o menys complexa. Aquest fet és degut a que en una massa forestal és complicat aïllar una copa de les adjacents, ja que aquestes són irregulars i es troben entrecreuades ocupant tot l'espai possible generant un continu horitzontal. Per aquest motiu el LiDAR no detecta peus directament en la recollida de dades, si no que capta punts de la superfície arbrada i després s'han de filtrar per determinar quins d'aquests punts són arbres i quins no.

Analitzant la informació vertical proporcionada a partir de les dades LiDAR es pot observar (Figura 16) que la forma del dosser de copes a l'estrat dominant es comporta com una corba continua de màxims i mínims, on el màxim correspon a la part més alta de la copa interceptada (que no té perquè coincidir amb el propi àpex de l'arbre) i el mínim amb la base de la copa viva dels peus dominants.

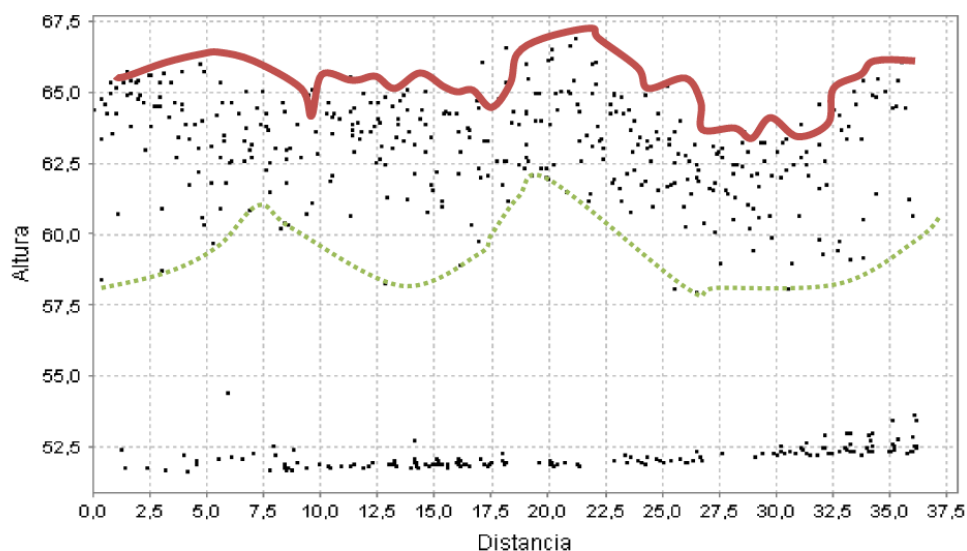


Figura 16. Perfil transversal de la capa LAS (1 pols/m²) on es poden observar els màxims i mínims relatius de les capçades dels arbres (Reyna, S., *et al*, 2010).

Per determinar el nombre de peus a partir de les dades LAS s'ha fet servir el software DielmoOpenLidar (Dielmo 3D SL) que es basa en una sèrie d'algoritmes que determinen el màxim relatiu per a un determinat nombre de píxels. Aquest màxim es determina comparant l'alçada de cada píxel amb la dels adjacents, si el píxel és major el programa el considera un arbre i guarda les seves coordenades i la seva alçada (Figura 17). El nombre de píxels és una variable del programa que pot ser modificada per l'usuari.

9	10	11	12	13
24	1	2	3	14
23	8	h>	4	15
22	7	6	5	16
21	20	19	18	17

Figura 17. Esquema d'un píxel que és màxim relatiu respecte dels adjacents (vermell). En groc els píxels de la primera fila que es comparen amb el central i en marró la segona fila de píxels quan s'amplien els píxels que es comparen amb el central. Els números indiquen la numeració correlativa dels píxels. h>, és el màxim relatiu (Reyna *et al*,2010).

Per determinar el nombre de píxels adequat que s'ha d'agafar, per veure la densitat de peus que hi ha a la zona en estudi, DielmoOpenLidar fa una comparació relativa fent proves amb h>8 píxels i h>24 píxels confrontats. Com que cada píxel representa 1m² de superfície, això suposa un màxim relatiu cada 9m² (8 píxels) i cada 25m² (24 píxels).

La conclusió és que la restricció d'un nombre de peus màxim per unitat de superfície, suposa una restricció en la densitat màxima que el programa és capaç d'estimar. Amb pixelats molt petits (h>8) es detecten densitats elevades, però si s'apliquen en llocs on la densitat d'arbres és baixa, es podria sobreestimar la densitat ja que es podrien identificar copes grans, deformades o bifurcades com si fossin dos peus. En el cas contrari, amb pixelats grans (h>24) és impossible determinar densitats elevades. A la Taula 2 es pot veure una classificació per les diferents densitats.

Taula 2. Tipus de pixelat adequat per a cadascú dels rangs de densitat. Font: elaboració pròpia (Adaptació, Reyna *et al*, 2010)

h>	Nº peus màxim detectat	Densitat alta (>1200 peus)	Densitat mitja (òptim 800 peus/ha)	Densitat baixa (<400peus/ha)
8 píxels	1peu/9m ²	Óptim	Detecta major nombre de peus (copes deformades i bifurcades)	Detecta major nombre de peus
23 píxels	2peus/25m ²	Detecta menys peus que els reals	Óptim	Detecta major nombre de peus (copes deformades i bifurcades)
24 píxels	1peu/25m ²	Detecta molts menys peus que els reals	Detecta menys peus dels reals	Óptim

Com a exemple d'aplicació de la Taula 2 tenim una zona on es troben arbres aïllats amb un gran desenvolupament de capçada (Figura 18) que fa que l'aplicació LiDAR estimi 4 peus on realment hi ha sols 2 peus. En aquest cas l'ús de 24 píxels (amb un màxim relatiu cada 25 m²) dóna el resultat real.

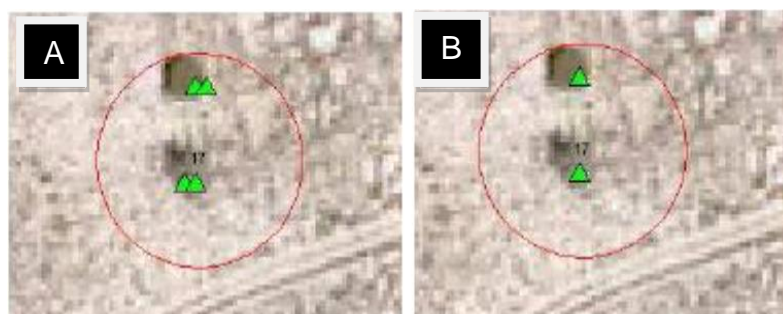


Figura 18. Detecció d'arbres segons el pixelat. A) pixelat de h>8, LiDAR detecta 4 arbres. B) pixelat de h>24, LiDAR detecta 2 arbres (Fabra *et al*, 2010b).

A la Figura 19 es pot veure com amb un pixelat de 8 (A) es detecten molts més arbres que amb un pixelat de 24 (B).

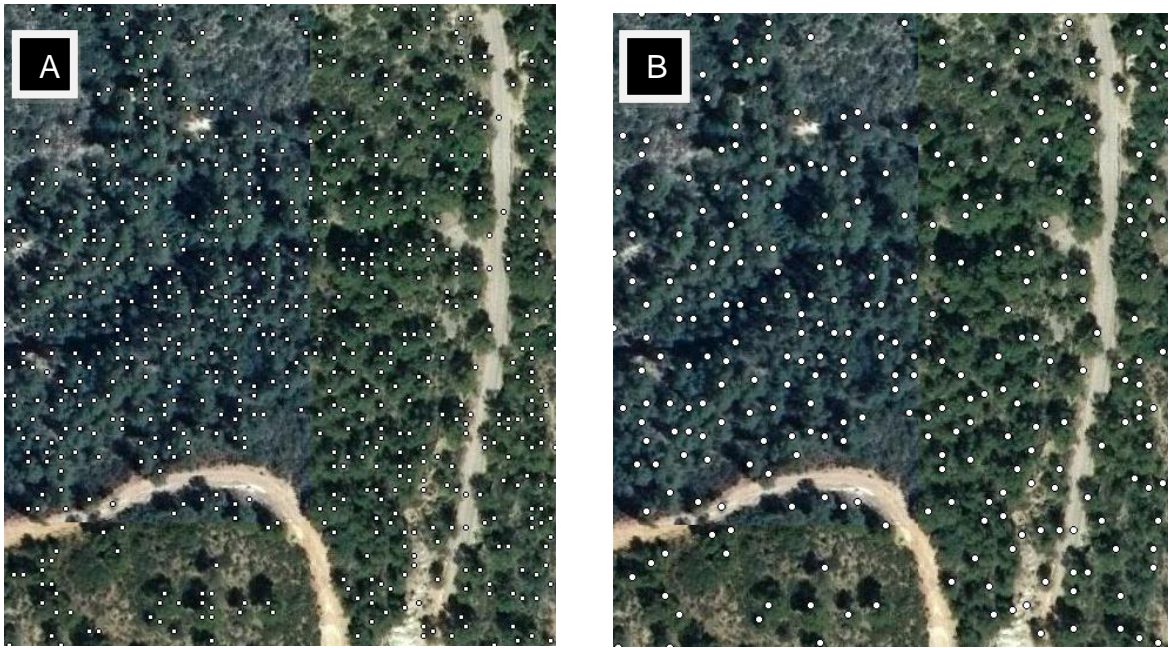


Figura 19. Imatge de la finca en estudi. A) Amb capa d'arbres detectats amb LiDAR amb 8 píxels. B) Capa d'arbres detectats amb LIDAR amb 24 píxels. Font: Elaboració pròpia.

Si s'observa la part inferior de la Figura 19 es pot comprovar com en les zones de baixa densitat d'arbres, la resolució de 24 píxels (B), és més exacta, ja que el LiDAR dóna un punt per cada arbre. En canvi, amb la resolució de 8 píxels (A) en alguns casos ha detectat més d'un arbre, quan en realitat n'hi ha un. Això pot donar-se en casos en que un arbre té una copa molt gran i el LiDAR l'interpreta com dos arbres.

El següent pas és distingir entre els punts corresponents a l'arbrat i els corresponents a matoll. Per aquest motiu, a més d'especificar el pixelat, l'aplicació també permet seleccionar una alçada mínima (z) per sota de la qual no es tenen en compte els punts. Aquesta alçada mínima serveix per determinar només els arbres d'una determinada mida o si hi ha un forat a la massa que no es tinguin en compte els matolls. Per aquest treball s'ha establert una alçada de 3 m pel paràmetre z, ja que en tots els casos el sotabosc presenta una alçada inferior.

2.4.2.2. Determinació de l'alçada dels arbres

L'alçada, junt amb el diàmetre, és una variable fonamental i necessària per caracteritzar l'estructura d'una massa i principalment per quantificar el volum a partir de la relació alçada-diàmetre (Reyna, S. *et al*, 2010).

Per calcular l'alçada a partir de les dades LiDAR s'ha utilitzat el programari DielmoOpenLiDAR (Dielmo 3D SL, Valencia) i Miramon (CREAF, Barcelona). La metodologia per al càlcul de l'alçada individual dels arbres s'obté de forma anàloga a la de la densitat, basant-se en la metodologia exposada en el apartat anterior, de manera que es poden diferenciar les copes unes de les altres dins el conjunt del dossier de la cobertura forestal, donant-se per suposat que l'alçada del peu correspon amb el màxim relatiu. El mètode en que es basa el programa consisteix en obtenir la diferència entre el MDS i el MDT, que com s'ha comentat anteriorment, dóna directament l'alçada de la vegetació.

Com a consideració, indicar que l'alçada de la vegetació estimada a partir del MDC (Model Digital de Cobertura) pot acumular els errors de la generació del MDS (Model Digital de Superfícies) i el MDT (Model Digital del Terreny), especialment el MDT en zones amb una orografia complexa, com fortes pendents, pot aportar errors significatius (Fabra, M. *et al*, 2011).



Figura 20. Mesures d'alçada amb LiDAR sobre una massa de *Pinus halepensis* (Fabra *et al*, 2010b)

2.4.2.3. Determinació de la fracció de cabuda coberta

Per al càlcul de la FCC (Fracció de Cabuda Coberta) s'ha utilitzat, com en els casos anteriors, l'aplicació informàtica DielmoOpenLiDAR (Dielmo 3D SL, Valencia) sobre base gvSIG. que obté les dades de la FCC a partir del MDC (Model Digital de Cobertura). Es realitza assignant un valor binomial a cada punt; un 1 per aquells píxels que tinguin un valor de cota superior a l'estipulada ($z=3$) i un valor 0 per aquells que estiguin per sota de z . D'aquesta manera es pot veure una capa binomial com s'observa a la Figura 21, on la vegetació que apareix en color blanc (té assignat un 1) i allà on la vegetació es troba per sota de z apareix en color negre (té assignat un 0). L'aplicació té en compte la definició silvícola de FCC: grau de recobriment del sòl per la projecció vertical de les copes de l'arbrat (S.E.C.F., 2005). Per tal d'aconseguir-ho elimina els píxels negres que queden dins les copes dels arbres expandint i contraent els píxels, donant lloc a estructures homogènies en les copes (Reyna *et al*, 2010).

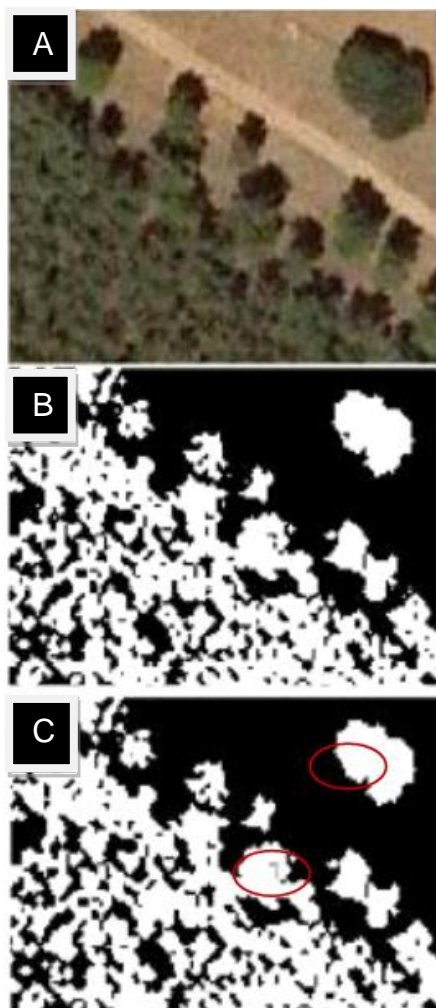


Figura 21. Determinació de la FCC a partir de dades LiDAR. A) Visió amb ortofotografia . B) Visió de la capa binomial: on hi ha vegetació és blanc i on no n'hi ha és negre. C) FCC amb eliminació de píxels a l'interior de les copes (Reyna *et al*, 2010).

Una vegada obtingudes les diferents capes segons la z mínima, es calcula la FCC per a cada estrat. Per fer-ho, en el programa informàtic que conté les diferents capes, es realitza un tall de la capa dels estrats sobre la capa de FCC aleshores es comptabilitzen el nombre de 1 i de 0 que hi ha dintre de cada estrat. El valor de FCC s'obté del producte dels píxels que han interceptat coberta vegetal (1) amb el total de píxels dins de l'estrat, segons l'equació 8.

$$\text{FCC} = \frac{\text{N}^{\circ} \text{ píxels valor 1}}{\text{N}^{\circ} \text{ píxels total}} \times 100 \quad (\text{Equació 8})$$

El píxel que ha donat l'aplicació DielmoOpenLiDAR (Dielmo 3D SL, València) té unes dimensions de 20 x 20 metres, a l'hora de realitzar l'estudi aquesta mida s'ha considerat suficientment; donat que la FCC són els punts que queden interceptats per la vegetació, front els que arriben a terra, el resultat seria el mateix si es fes un píxel més petit. Per tant, donat que les parcel·les tenen un radi de 10 metres i són representatives de tot l'estrat, no s'ha realitzat la comparació LiDAR-Tradicional a nivell parcel·la per aquesta variable, però sí a nivell dels estrats.

3. TRACTAMENT I ANÀLISI ESTADÍSTIC

L'estadística empleada per la comparació de les dades de camp i les dades LiDAR es realitza amb el programa Excel 2010 (Microsoft, WA, EE.UU.) i SPSS20 (IBM, EE.UU.). Per realitzar l'anàlisi, en tots els casos es treballa amb un nivell de significació de $p \leq 0,05$, és a dir, un nivell de confiança del 95 %.

L'estudi estadístic es basa, en primer lloc en l'anàlisi de regressions, per veure com s'ajusten els valors obtinguts a una funció rectilínia. En segon lloc en l'anàlisi de variances, on s'estudia la diferència entre les mitjanes poblacionals i la seva significació a partir de la comparació de variances.

3.1. Anàlisi de regressions

Aquesta tècnica d'anàlisi permet avaluar si la relació entre dues variables (dependent i independent) segueix una funció rectilínia i com s'ajusten les dades observades a aquesta relació amb el coeficient R^2 de l'ajustament. També és una tècnica utilitzada per desenvolupar una equació lineal amb fins predictius. Per aplicar-la les variables han de complir els següents requisits:

- Linealitat
- Independència dels residus (diferències entre els valors observats i els pronosticats)
- Normalitat de residus
- Igualtat de variances dels residus

La linealitat es comprova emprant el coeficient de determinació (R^2), que és el quadrat del coeficient de correlació (R).

Per al cas de la independència, aquesta s'ha avaluat fent ús del test de Durbin-Watson. Aquest estadístic oscil·la entre els valors 0 i 4 i pren el valor 2 quan els residus són completament independents. Per a valors superiors a 2 indica autocorrelació positiva i si el valor és inferior a 2 indica autocorrelació negativa. Si aquest estadístic pren valors entre 1.5 i 2.5 no hi ha raó per suposar que els residus no són independents (López *et al*, 1999).

Per comprovar la normalitat dels residus s'ha fet servir el test de Kolmogorov-Smirnov.

Amb la prova de Levene es comprova si les variàncies són iguals. Si la probabilitat associada a l'estadístic de Levene és ≥ 0.05 , es suposa que les variàncies són iguals. Si pel contrari l'estadístic de Levene és < 0.05 , llavors es suposa que les variàncies són diferents.

Amb la bondat de l'ajustament s'obtenen l'equació de la recta i els coeficients que determinen el nivell de correlació entre un mètode i l'altre.

Per comprovar el nivell de significació dels resultats obtinguts, es realitza un contrast d'hipòtesi basat en la prova F-Fischer. Es plantegen les següents hipòtesis:

- H_0 (hipòtesi nul·la): pendent de la recta és $= 0$
- H_a (hipòtesi alternativa): pendent de la recta és $\neq 0$

Si la significació de la prova és ≥ 0.05 s'accepta la hipòtesi nul·la i s'accepta que el pendent de la recta és igual a zero.

Si la significació de la prova és < 0.05 es rebutja la hipòtesi nul·la i s'accepta la hipòtesi alternativa, és a dir, que el pendent de la recta és diferent de zero.

També s'ha fet una comprovació d'errors per detectar possibles divergències en la distribució de les mostres.

3.2. Anàlisi de diferències de mitjanes

El contrast de dues mitjanes consisteix a comparar els resultats obtinguts en l'estimació de dues mitjanes d'una variable a partir de dues mostres i veure si existeixen diferències entre ambdues i si aquestes diferències són estadísticament significatives (Lòpez, 1999). El resultat d'aquesta prova és el mateix que s'obté en una anàlisi de variància quan la variable independent que defineix els grups només té dos valors.

El mètode consisteix en fer un contrast d'hipòtesi sobre les mitjanes poblacionals amb la prova de la T. La prova T per dues mostres independents que permet

contrastar la hipòtesi d'igualtat de mitjanes, és una tipificació de la diferència entre les dues mitjanes mostrals, que s'obtenen restant a aquesta diferència el seu valor esperat en la població i dividint el resultat per l'error típic de la diferència (Delgado, 2007).

L'estadístic t es distribueix segons el model de probabilitat *t-student* i el contrast d'hipòtesi que es planteja en aquest cas és el següent:

- Ho: mitjanes poblacionals de les mostres són iguals $\mu_1 = \mu_2$
- Ha: mitjanes poblacionals de les mostres són diferents $\mu_1 \neq \mu_2$

(Ho= hipòtesi nul·la; Ha= hipòtesi alternativa)

Per tal de decidir si es pot suposar que les variàncies poblacionals són iguals, situació d'homoscedasticitat, es fa la prova de Levene sobre igualtat de variàncies i amb l'estadístic t es pot realitzar la prova estadística per tal de determinar si les dues mitjanes observades són significativament diferents.

Si la $p(t) \geq 0.05$ s'accepta la hipòtesi nul·la que les mitjanes poblacionals són iguals.

Si la $p(t) < 0.05$ es rebutja la hipòtesi nul·la i s'accepta que les mitjanes poblacionals són diferents.

Amb el software SPSS 20 (IBM, EE.UU.) s'ha realitzat un anàlisi amb la prova T per mostres independents, per comprovar si hi ha diferències significatives, segons el mètode utilitzat, tradicional o LiDAR, a l'hora de mesurar les variables.

Per comprovar l'homogeneïtat de variàncies s'ha realitzat la prova de Levene.

Amb els diagrames de caixes i bigotis es pot observar el comportament de la distribució de les dades per comprovar si existeixen valors atípics i/o extrems i el tipus de simetria al voltant de la mitjana.

4. RESULTATS

A continuació es presenten els resultats obtinguts amb els dos mètodes estudiats, tradicional i LiDAR, a nivell parcel·la, així com les relacions existents entre les variables analitzades a aquest mateix nivell.

Anàlogament es presenta la mateixa relació entre els dos mètodes a nivell estrat, per tal de traslladar la comparació a un nivell més global.

4.1. Resultats a nivell parcel·la

En aquest apartat es presenten els resultats obtinguts a nivell parcel·la de les 24 parcel·les de les variables mesurades amb les dues metodologies. A continuació s'exposen, en apartats diferents i per cadascuna de les variables, els valors obtinguts amb el mètode LiDAR per tal de comparar-los amb els obtinguts en el mètode tradicional.

4.1.1. Variable densitat

Les densitats obtingudes utilitzant el mètode LiDAR amb les dues resolucions; 8 i 24 píxels, es presenten a la Taula 3. Observant les dades es pot veure com la resolució de 24 píxels subestima en tots els casos els resultats.

Taula 3. Densitats obtingudes utilitzant el mètode tradicional i les dues resolucions del mètode LiDAR. Les unitats són peus/parcel·la.

PARCEL·LA	densitat M.trad.	densitat LiDAR x8 píxels	densitat LiDAR x24 píxels
1	21	26	6
2	11	19	6
3	15	16	8
4	11	14	5
5	18	14	7
6	35	18	7
7	25	20	9
8	9	13	7
9	6	11	3
10	28	21	7
11	25	21	9
12	22	33	9
13	60	37	12
14	17	30	9
15	18	22	5
16	13	33	7
17	23	20	9
18	19	16	6
19	12	17	5
20	20	16	8
21	29	20	11
22	28	17	5
23	27	22	6
24	48	31	9

A partir d'aquestes dades s'han establert relacions per comparar els dos mètodes. Amb la regressió lineal es veu com s'ajusta el mètode LiDAR al tradicional, el resultat es pot observar a la Figura 22.

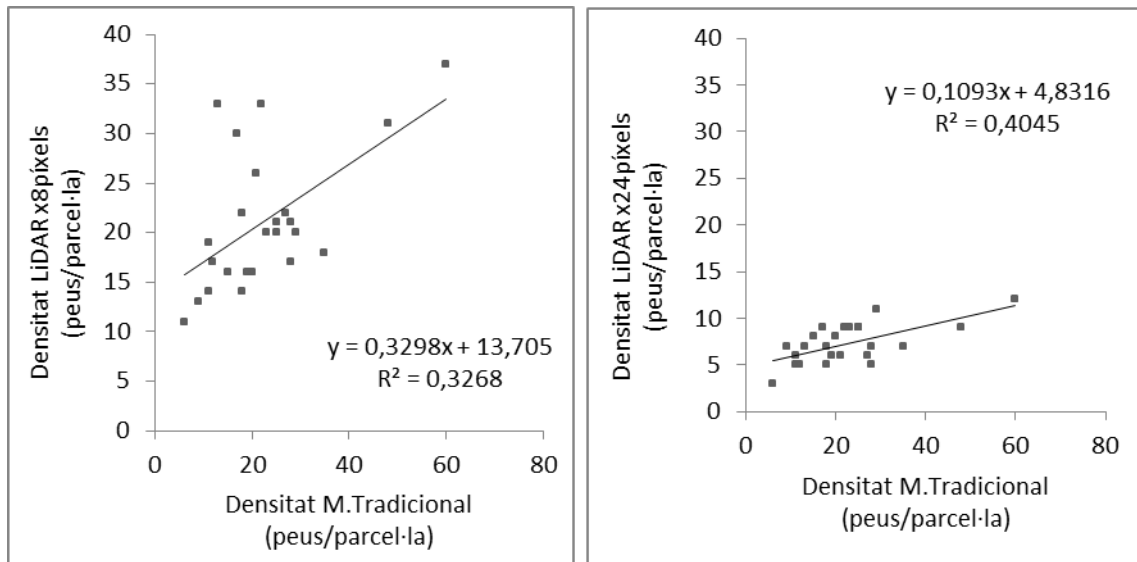


Figura 22. Relació entre la densitat a nivell parcel·la, mesurada amb LiDAR a 8 i 24 píxels i mesurada amb el mètode tradicional.

De l'anàlisi d'aquesta regressió s'extreu que a les equacions obtingudes la correlació és baixa en tots dos casos, $R^2 = 0.3268$ en 8 píxels i $R^2 = 0.4045$ en 24 píxels. S'ha observat que per segons quines densitats el LiDAR s'adapta millor amb un tipus de resolució que amb l'altre, tal i com es va veure a la Taula 2. En aquesta taula hi ha la resolució LiDAR de 23 píxels, que consisteix en detectar dos màxims relatius cada 25 píxels. En el moment de desenvolupar aquest treball no va ser possible obtenir les dades a 23 píxels, per aquest motiu es va decidir realitzar una tria entre les dades obtingudes a 8 i 24 píxels. Aquesta tria va consistir en utilitzar la resolució LiDAR de 24 píxels per densitats baixes, considerant densitats baixes les inferiors a 600 peus/ha (18 peus/parcel·la). I la resolució LiDAR de 8 píxels per densitats altes, les superiors a 600 peus/ha.

A la Figura 23 es pot observar el resultat d'utilitzar una tria de resolucions del LiDAR que s'adapten millor al tipus de densitat de cada parcel·la.

L'ajust obtingut en l'estudi de la regressió és discret, degut a que el pendent de la recta té un valor de 0.649 i el coeficient de determinació $R^2 = 0.684$, i això suposa una correlació moderada.

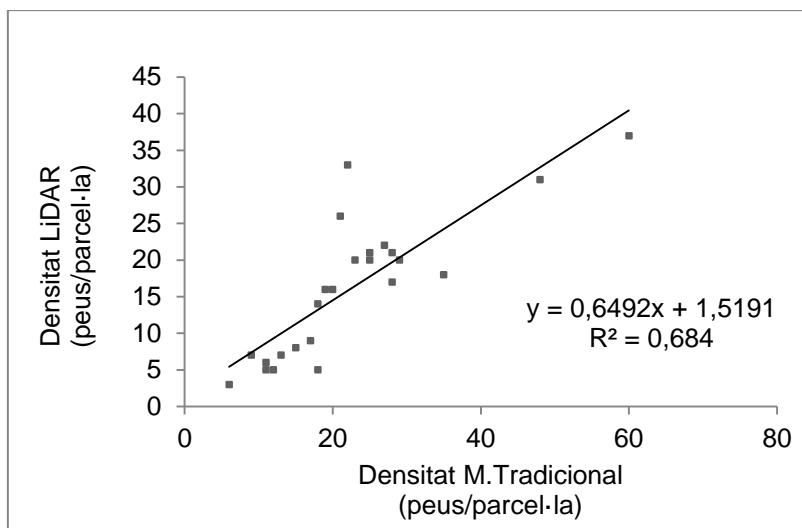


Figura 23. Relació entre la densitat mesurada amb el mètode tradicional i amb el LiDAR. En aquesta cas s'ha fet una tria de la resolució del LiDAR en funció de les densitats de les parcel·les.

A partir de les dades obtingudes a les parcel·les amb els dos mètodes s'ha obtingut l'anàlisi descriptiu de la Taula 4:

Taula 4. Estadístics de la densitat

VARIABLE DENSITAT	TRADICIONAL	LiDAR
Mida mostra	24	24
Mitjana	22,50	16,13
Variança	148,52	91,51
Desv.Estàndard	12,19	9,57
E.Típic de la mitjana	2,49	1,95
Coef. Var. (%)	54,16	59,32
Min.	6,00	3,00
Màx.	60,00	37,00

Les dades del mostreig contenen un error absolut mig proper al 36 % i una subestimació de la densitat, per part de les dades LiDAR, com s'observa a l'error mig (EM) de la Taula 5:

Taula 5. Errors en l'estimació de la variable densitat. (EM) error mig, (EMA) error mig absolut, (PEMA) percentatge d'error mig absolut, (RMSE) error quadràtic mig, (E. típic) error típic.

	EM	EMA	PEMA	RMSE	E.típic
Densitat	-6,38	7,71	35,80%	9,27	5,50

En la prova F-test, la probabilitat associada a l'estadístic F és inferior a 0.05 (nivell de significació obtingut a la prova = 0.000), llavors es rebutja la hipòtesi nul·la, per tant s'accepta la hipòtesi alternativa. La conclusió és que el model és vàlid, ambdues variables estan linealment relacionades i té un poder predictiu avaluat amb un coeficient de determinació $R^2=0.684$.

El resultat en la prova de la T per la igualtat de mitjanes, també ha estat positiu, donant com a resultat que les diferències entre els mètodes tradicional i LiDAR alhora de mesurar la variable densitat, no són estadísticament significatives.

A la Figura 24 hi ha el gràfic de caixes i bigotis. En ell es poden observar les caixes, que agrupen el 50 % dels valors centrals de cadascun dels mètodes. Els bigotis indiquen cap a on es desplacen els valors més allunyats del centre. En el cas del mètode tradicional s'observen dos valors atípics per la part superior de la caixa, en canvi la resta de valors es troben distribuïts de forma simètrica. En el cas del LiDAR, el desplaçament de la mitjana cap amunt i la concentració de valors per sobre del percentil 75, indiquen una asimetria negativa de les dades.

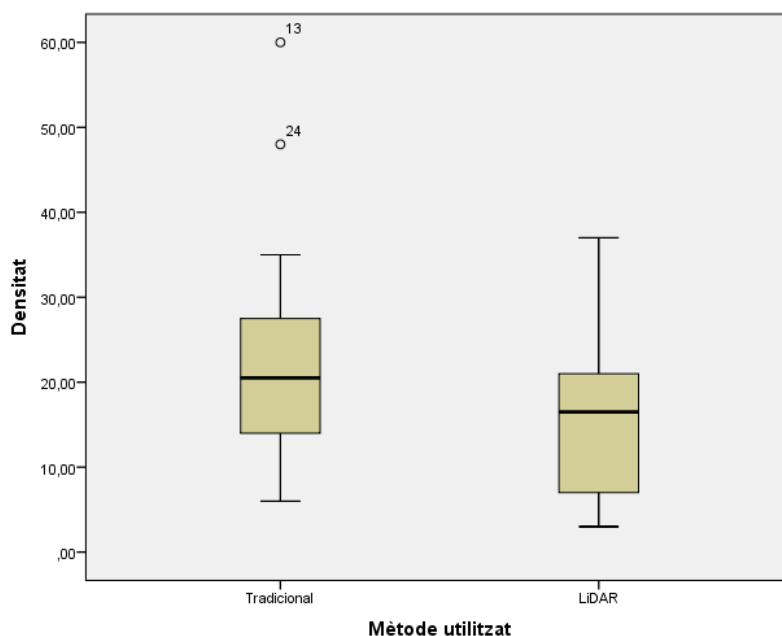


Figura 24. Diagrama de caixes corresponents al dos mètodes estudiats per la variable densitat

4.1.2. Variable alçada

Per relacionar les dades de la variable alçada s'han utilitzat les mesures mitjanes obtingudes amb cada mètode. A la Taula 6 es poden veure els valors obtinguts utilitzant el mètode tradicional i el mètode LiDAR per les dues resolucions.

Taula 6. Resultats de la variable alçada per les dues resolucions del LiDAR i per al mètode tradicional

PARCEL·LA	Alçada (m) M.trad.	Alçada (m) LiDAR x8 píxels	Alçada (m) LiDAR x24 píxels
1	11,90	9,54	10,87
2	9,77	8,50	9,00
3	8,97	6,69	7,55
4	11,97	6,00	7,75
5	11,13	9,22	8,83
6	11,33	11,01	10,80
7	7,87	6,73	6,69
8	13,73	12,11	13,29
9	9,97	9,50	9,97
10	12,97	13,16	14,70
11	19,67	14,80	16,19
12	14,07	11,91	13,01
13	19,20	14,02	15,56
14	16,00	12,93	13,88
15	13,67	11,87	14,55
16	9,97	8,64	10,20
17	11,17	10,05	10,26
18	12,27	9,71	11,51
19	12,20	10,68	11,97
20	12,10	9,78	9,99
21	10,63	9,42	9,89
22	6,80	6,76	7,25
23	9,87	9,31	9,79
24	10,27	9,10	9,98

A la Figura 25 es poden veure les dues gràfiques del resultat de la regressió lineal sobre la variable alçada. Una gràfica amb la comparació del mètode tradicional i el LiDAR amb resolució de 8 píxels i l'altra amb la comparació del tradicional i el LiDAR a 24 píxels.

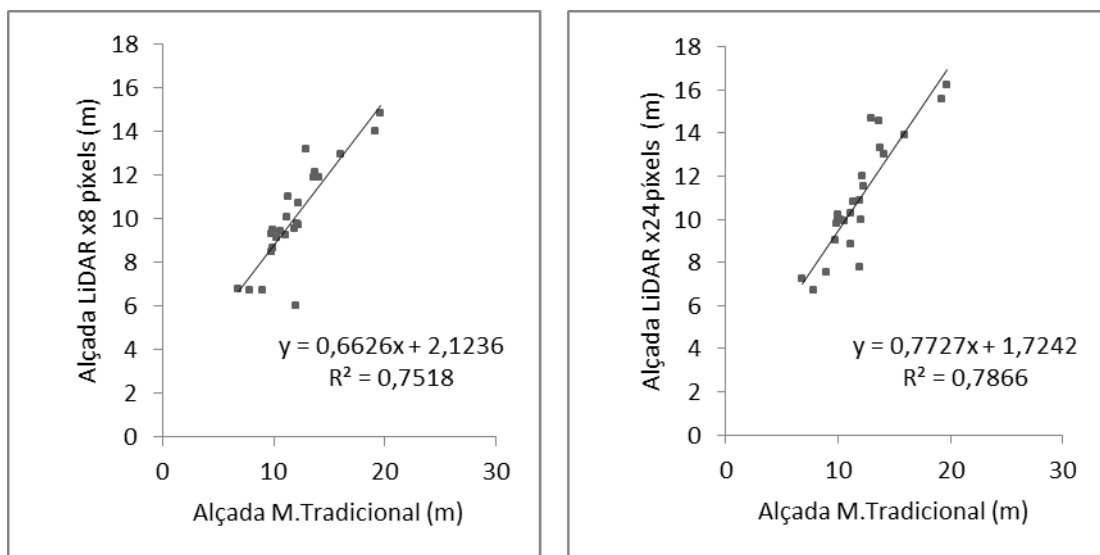


Figura 25. Relació entre l'alçada mesurada amb LiDAR a 8 i 24 píxels i l'alçada mesurada amb el mètode tradicional.

Els coeficients de determinació obtinguts en l'anàlisi de regressions indiquen una correlació alta amb valors de $R^2 = 0.7518$ per la resolució de 8 píxels i $R^2 = 0.7866$ per la resolució de 24 píxels. Els pendents de les equacions de la recta són 0.6626 per la resolució de 8 píxels i 0.7727 per la de 24 píxels.

A partir de les dades obtingudes en el mostreig de les parcel·les amb els dos mètodes, s'ha obtingut l'anàlisi descriptiu de la Taula 7:

Taula 7. Estadístics de l'alçada

VARIABLE ALÇADA	TRADICIONAL	LiDAR x8	LiDAR x24
Mida mostra	24	24	24
Mitjana	11,98	10,06	10,98
Variança	9,38	5,48	9,97
Desv. Estàndard	3,06	2,34	2,67
E. Típic de la mitjana	0,63	0,48	0,54
Coef. Var. (%)	25,56	23,26	24,30
Min.	6,80	6,00	6,69
Màx.	19,67	14,80	16,19

Aquestes dades contenen un error absolut mig proper al 15 % en el cas de 8 píxels i del 10 % en el de 24. Hi ha subestimació de l'alçada, per part de les dades LiDAR, en tots dos casos, com s'observa a l'error mig (EM) de la Taula 8.

Taula 8. Errors en l'estimació de la variable alçada. En el mètode LiDAR l'estimació s'ha realitzat amb els dos tipus de resolució, 8 i 24 píxels. (EM) error mig, (EMA) error mig absolut, (PEMA) percentatge d'error mig absolut, (RMSE) error quadràtic mig, (E.típic) error típic.

	EM	EMA	PEMA	RMSE	E.típic
Alçada amb LiDAR x8	-1,92	1,93	15,20%	2,45	1,19
Alçada amb LiDAR x24	-1,00	1,27	10,00%	1,71	1,26

En el F-test, la probabilitat associada a l'estadístic F és inferior a 0.05 (nivell de significació obtingut a la prova = 0.000) tant en el cas de 8 píxels com en el de 24, llavors es rebutja la hipòtesi nul·la, per tant s'accepta la hipòtesi alternativa que diu que el pendent és diferent de zero, en tots dos casos.

De l'anàlisi de les mitjanes s'obté un resultat favorable, tant per la resolució de 24 píxels, amb una significació de 0.23, com per la resolució de 8 píxels, amb una significació de 0.19; valors tots dos clarament per sobre del 0.05 del supòsit. Per tant s'accepta la hipòtesi nul·la i es pot afirmar que les mitjanes poblacionals són iguals, complint el supòsit d'homoscedasticitat.

A la Figura 26 es troben els diagrames de caixa de la variable alçada analitzada amb els dos mètodes estudiats, el tradicional i el LiDAR. En el diagrama A) les dades del mètode LiDAR són per 8 píxels i en el diagrama B) les dades LiDAR són per 24 píxels. En el mètode tradicional es poden observar dos valors atípics per sobre de la caixa, en canvi la resta de valors es troben distribuïts de forma simètrica al voltant de la mitjana. En els dos casos del LiDAR les mitjanes estan desplaçades cap avall, el que indica que hi ha asimetria positiva. També es pot veure com la mitjana del mètode tradicional és més elevada que la del LiDAR. I dintre del mètode LiDAR, es veu que els valors en el cas de 24 píxels, estan més concentrats que en els de 8 píxels

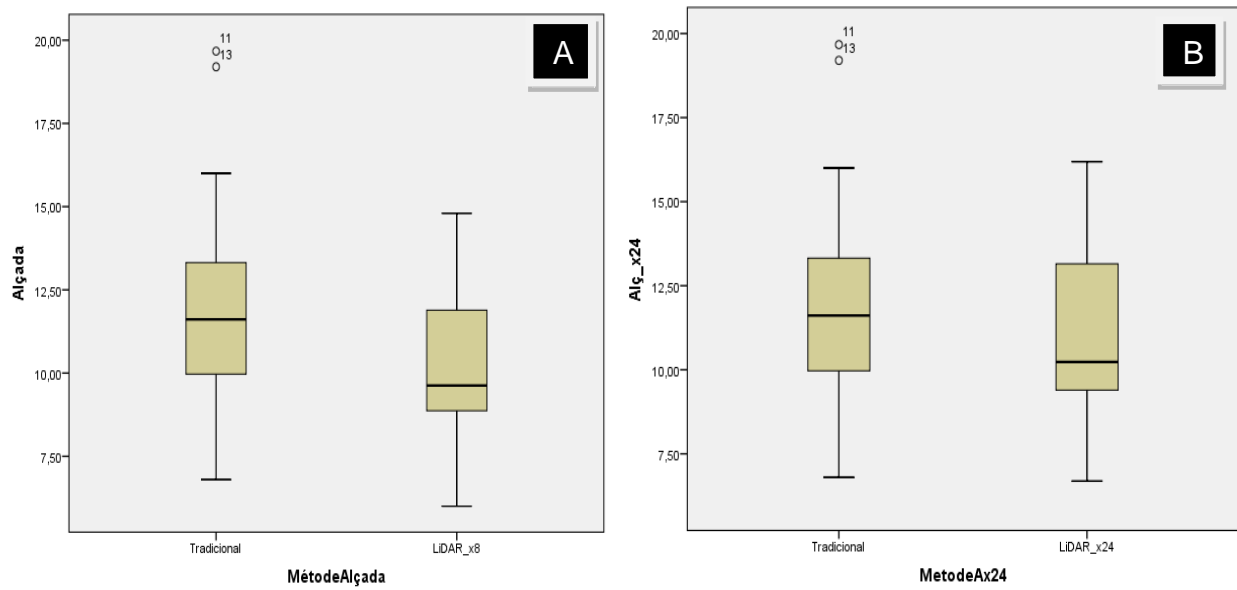


Figura 26. A) Gràfic de caixes de la variable alçada analitzada amb els dos mètodes, tradicional i LiDAR amb 8 píxels de resolució. B) Gràfic de caixes de la variable alçada analitzada amb els dos mètodes, tradicional i LiDAR amb 24 píxels de resolució.

4.2. Resultats a nivell estrat

En la comprovació d'errors, segons la metodologia descrita a l'apartat 2.3.3.3 d'aquest document, es pot veure que els errors obtinguts són molt baixos, excepte a l'estrat I, on l'error és del 21,19 %, degut a la gran varietat de diàmetres que conté aquest estrat. Encara que sigui un error elevat, comparat amb la resta d'estrats, es troba dintre de l'error admès per a boscos amb objectius preferentment protectors del 25 %. Amb aquesta comprovació d'errors es confirma que la intensitat de mostreig és suficient a cada estrat. A la Taula 9 es poden veure els resultats de l'àrea basimètrica per cada estrat, així com la comprovació d'errors.

Taula 9. Resultats de l'àrea basimètrica per cada estrat i la comprovació d'errors. (AB) Àrea basimètrica, Desviació típica, (CV) Coeficient de variació, (n) nombre de parcel·les.

Parcel·la	AB (m ² /ha)	Mitjana AB (m ² /ha)	Desv.Típica (m ² /ha)	CV (%)	t-student	n	Error (%)
Estrat I							
parcel·la 3	6,99	8,80	1,50	17,07	2,78	5	21,19
parcel·la 7	10,70						
parcel·la 9	8,66						
parcel·la 16	7,80						
parcel·la 24	9,85						
Estrat II							
parcel·la 1	15,62	14,75	1,30	8,82	2,26	10	6,31
parcel·la 2	11,53						
parcel·la 4	14,09						
parcel·la 5	14,29						
parcel·la 8	15,15						
parcel·la 12	14,97						
parcel·la 17	14,83						
parcel·la 18	15,54						
parcel·la 19	16,31						
parcel·la 23	15,19						
Estrat III							
parcel·la 6	18,44	18,1	0,8	4,39	2,78	5	2,98
parcel·la 14	18,65						
parcel·la 21	17,08						
parcel·la 22	17,43						
parcel·la 20	18,89						
Estrat IV							
parcel·la 10	29,63	29,59	0,07	0,22	12,71	2	1,99
parcel·la 11	29,54						
Estrat V							
parcel·la 13	40,12	40,12	0,00	0,00	0,00	1	0,00
Estrat VI							
parcel·la 15	42,46	42,46	0,00	0,00	0,00	1	0,00

A continuació es presenten els resultats obtinguts a partir de la comparació a nivell dels estrats. Com a l'apartat anterior es presenten els resultats que ha donat l'anàlisi estadístic per cadascuna de les variables, densitat, alçada i fracció de coberta. En aquest cas les dades del mètode tradicional, són resultat de l'extrapolació de les dades que es van prendre a camp, ja que és aquesta la tècnica que es fa servir a l'hora de realitzar un inventari tradicional. En canvi, en el cas de les dades LiDAR, provenen de la mesura directa que realitza el LiDAR sobre el terreny. Per tant ara, la unitat de comparació és l'estrat.

4.2.1. Densitat a nivell d'estrat

A la Taula 10 es pot veure la superfície de cadascun dels estrats en que s'ha dividit la part de la finca inventariada. Es presenten les dades de densitat per hectàrea i la densitat per estrat obtingudes en el mètode tradicional i també les dades de densitat que s'han obtingut amb el mètode LiDAR per cada resolució.

Taula 10. Densitats obtingudes per cada estrat en funció del mètode utilitzat per a obtenir-les. El resultat es dona en nombre de peus per cada estrat.

Estrats	Superfície (ha)	Densitat (p/ha)	M.Trad (p/estrat)	M.LiDAR x8 (p/estrat)	M.LiDAR x24 (p/estrat)
I	33,276	681	22667	17615	5710
II	44,100	551	24286	24127	8195
III	7,067	821	5804	3157	1220
IV	1,934	844	1631	1101	421
V	1,845	1910	3524	1510	359
VI	3,287	573	1883	1950	658

De l'anàlisi de regressió s'obté la relació entre els dos mètodes a l'hora d'obtenir les dades de densitat. A la Figura 27 es pot veure una correlació alta amb un $R^2=0.9672$ per 8 píxels i $R^2 = 0.9571$ per 24 píxels. El pendent de la recta en el cas de 8 píxels és molt millor, amb un valor de 0.9911, que en el cas de 24 píxels, amb un valor de 0.3101.

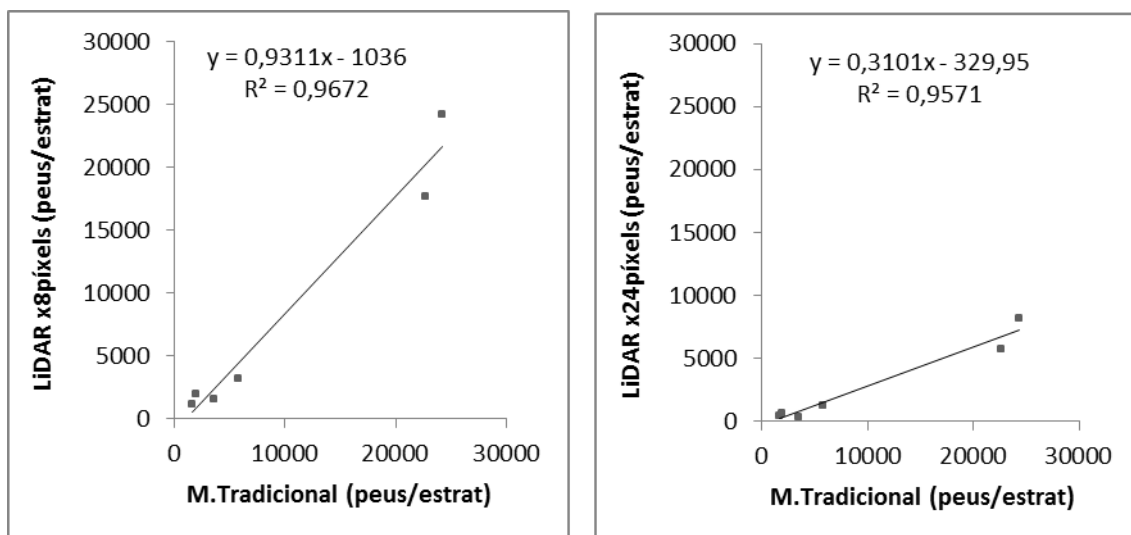


Figura 27. Relació entre la variable densitat mesurada amb mètode tradicional i amb LiDAR a nivell dels estrats. En aquest cas les dades del tradicional són extrapolades des de les parcel·les.

A partir de les dades anteriors s'ha obtingut l'anàlisi descriptiu de la Taula 11:

Taula 11. Estadístics de la densitat a nivell estrat, per LiDAR de 8 i 24 píxels i pel mètode tradicional.

VARIABLE DENSITAT	TRADICIONAL	LiDARx8	LiDARx24
Mida mostra	24	24	24
Mitjana	9965,91	8243,33	2760,50
Variança	112001613,66	100389307,47	11253489,90
Desv. Estàndard	10583,08	10019,45	3354,62
E. Típic de la mitjana	2160,26	2045,21	684,76
Coef. Var. (%)	106,19	121,55	121,52
Min.	1631,12	1101,00	359,00
Màx.	24285,79	24127,00	8195,00

De l'estimació de la densitat als estrats, resulta un error absolut mig proper al 27 % quan el LiDAR té una resolució de 8 píxels i del 75% en el de 24 píxels. Hi ha subestimació de la densitat, per part de les dades LiDAR, en tots dos casos, com es pot observar a la Taula 12.

Taula 12. Errors en l'estimació de la variable densitat a nivell estrat, obtinguts pels dos tipus de resolució, 8 i 24 píxels. (EM) error mig, (EMA) error mig absolut, (PEMA) percentatge d'error mig absolut, (RMSE) error quadràtic mig, (E.típico) error típic. Font: elaboració pròpia.

	EM	EMA	PEMA	RMSE	E.típic
Densitat x8 píxels	-1723	1745	27%	2480	2027
Densitat x24 píxels	-7205	7205	75%	9836	777

En el F-test per la densitat a nivell estrats, la probabilitat associada a l'estadístic F és inferior a 0.05 (nivell de significació obtingut a la prova = 0.000) tant en el cas de 8 píxels com en el de 24, llavors es rebutja la hipòtesi nul·la, per tant s'accepta la hipòtesi alternativa, que afirma que el pendent de la recta és diferent de zero, en tots dos casos.

De l'anàlisi de les mitjanes s'obté un resultat favorable tant per la resolució de 8 com per la de 24 píxels, amb unes significacions de 0.778 i 0.163 respectivament, valors tots dos per sobre de 0.05, per tant s'accepta la hipòtesi nul·la que les mitjanes poblacionals són iguals.

A la Figura 28 es presenten els diagrames de caixes i bigotis de la variable densitat, obtinguda a nivell dels estrats. A la figura A) les dades del mètode LiDAR són de 8 píxels i a la figura B) són de 24 píxels. En tots els casos les mitjanes estan desplaçades cap avall, el que indica asimetria positiva. En el cas del LiDAR de 24 píxels, les dades estan molt més concentrades que en els altres casos i es veu gran diferència en la mida dels valors obtinguts, clarament a la baixa. No s'observa cap valor atípic.

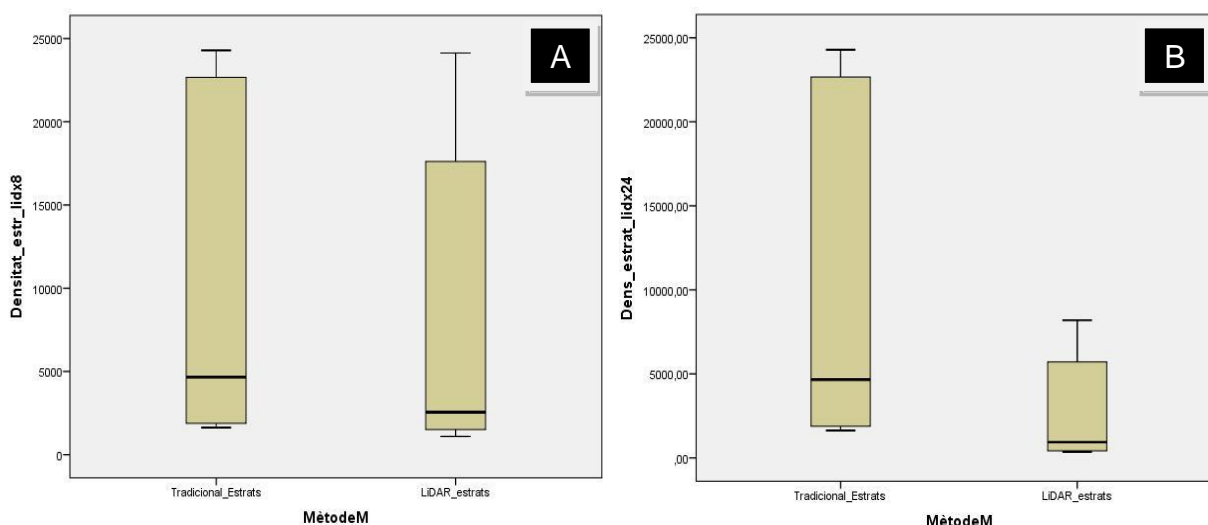


Figura 28. Gràfic de caixes i bigotis de la variable densitat a nivell estrat. A) La variable està mesura amb LiDAR x8 píxels. B) La variable està mesurada amb LiDAR x24 píxels.

4.2.2. Alçada a nivell estrat

A la Taula 13 es presenten els valors mitjans de la variable alçada per cada estrat obtinguts utilitzant el mètode tradicional, calculats mitjançant extrapolació de les dades de les parcel·les, i també les dades d'alçada obtingudes directament del mètode LiDAR per a cada resolució.

Taula 13. Alçades obtingudes per cada estrat en funció del mètode utilitzat per obtenir-les.

Estrats	Superfície (ha)	Alçada M.Trad (m)	Alçada LiDAR x8 (m)	Alçada LiDAR x24 (m)
I	33,276	9,41	8,21	8,89
II	44,100	11,81	8,59	9,3
III	7,067	11,37	9,34	9,61
IV	1,934	16,32	10,36	11,31
V	1,845	19,20	14,11	15,12
VI	3,287	13,67	8,11	9,09

De l'anàlisi de regressió s'obté la relació entre els dos mètodes a l'hora d'obtenir les dades de la variable alçada. A la Figura 29 es pot observar una correlació alta amb un $R^2=0.7488$ per 8 píxels i $R^2 = 0.8126$ per 24 píxels. El pendent de la recta en cada cas és de 0.5488 per 8 píxels i de 0.6023 per 24 píxels.

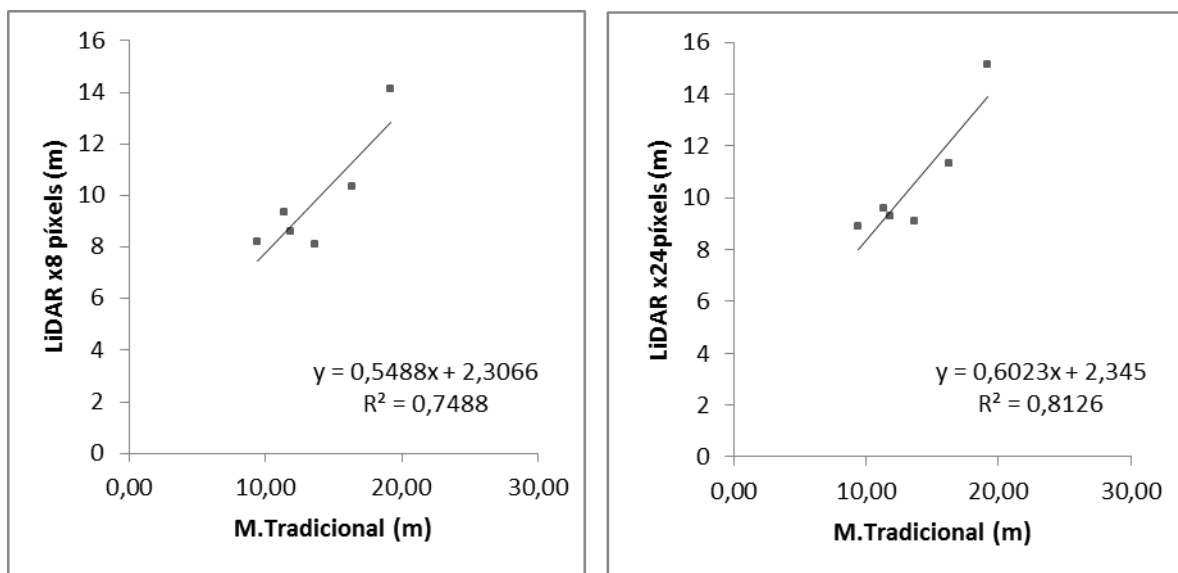


Figura 29. Relació entre la variable alçada, mesurada amb el mètode tradicional i amb el LiDAR(a 8 i 24 píxels), a nivell dels estrats. Font: elaboració pròpia.

A partir de les dades anteriors s'ha realitzat el següent anàlisi descriptiu de la Taula 14.

Taula 14. Estadístics de la variable alçada, per LiDAR de 8 i 24 píxels i pel mètode tradicional.

ALÇADA_ESTRATS	TRADICIONAL	LiDARx8	LiDARx24
Mida mostra	24	24	24
Mitjana	13,63	9,79	10,55
Variança	12,90	5,19	5,76
Desv. Estàndard	3,59	2,28	2,40
E. Típic de la mitjana	0,73	0,47	0,49
Coef. Var. (%)	26,35	23,28	22,74
Min.	9,41	8,11	8,89
Màx.	19,20	14,11	15,12

Aquestes dades contenen un error absolut mig proper al 27 % en el cas de 8 píxels i del 21% en el de 24. Hi ha subestimació de l'alçada, per part de les dades LiDAR, en tots dos casos (Taula 15).

Taula 15. Errors en l'estimació de la variable alçada a nivell estrats, obtinguts pels dos tipus de resolució, 8 i 24 píxels. (EM) error mig, (EMA) error mig absolut, (PEMA) percentatge d'error mig absolut, (RMSE) error quadràtic mig, (E.típic) error típic.

	EM	EMA	PEMA	RMSE	E.típic
Alçada_Estrats_x8p	-3,84	3,84	27%	4,25	1,28
Alçada_Estrats_x24p	-3,08	3,08	21%	3,47	1,16

La probabilitat associada a l'estadístic F, en la prova F-test, és de 0.026 per la resolució de 8 píxels, i de 0.014 per a la de 24 píxels, valors tots dos inferiors al 0.05 del contrast d'hipòtesi, per tant es rebutja la hipòtesi nul·la i s'accepta l'alternativa, és a dir, que el pendent és diferent de zero en els dos casos. Es conclou que el model és vàlid, ambdues variables estan linealment relacionades i tenen un poder predictiu avaluat amb un 75 % per al mètode LiDAR amb resolució de 8 píxels i d'un 81 % per al de 24 píxels.

De l'anàlisi de les mitjanes s'obté un resultat favorable tant per al LiDAR de 8 com per al de 24 píxels, amb significacions de 0.051 i 0.014 respectivament, valors tots dos per sobre de 0.05, per tant s'accepta la hipòtesi nul·la que diu que les mitjanes poblacions són iguals.

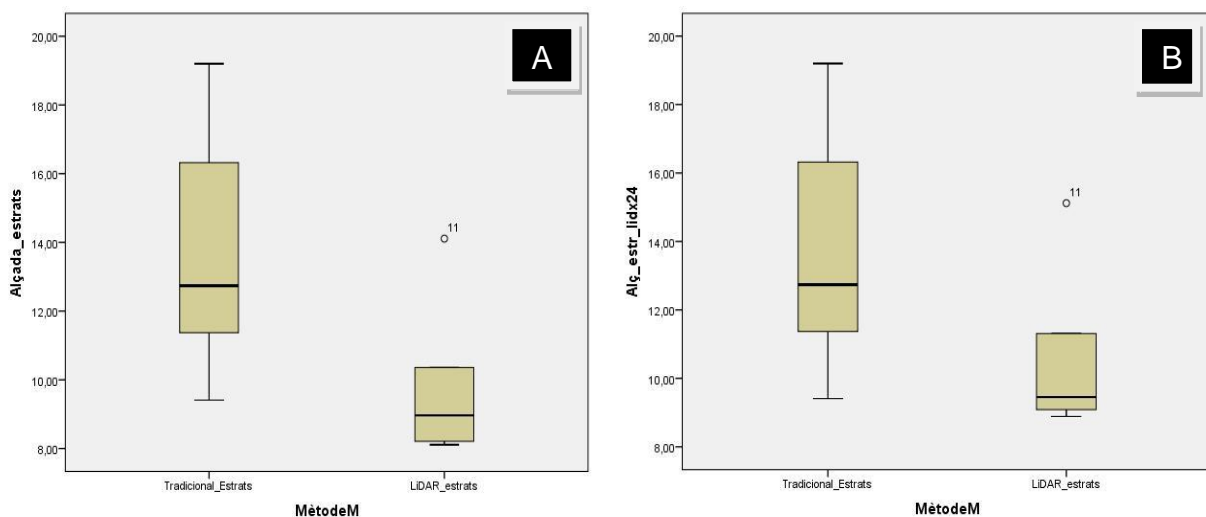


Figura 30. Gràfic de caixes i bigotis de la variable alçada a nivell estrat. A) La variable està mesura amb LiDAR x8 píxels. B) La variable està mesurada amb LiDAR x24 píxels.

Als gràfics de la Figura 30 es poden veure els diagrames de caixes i bigotis de la variable alçada, obtinguda a nivell dels estrats. A la gràfica A) les dades del mètode LiDAR són de 8 píxels i a la gràfica B) són de 24 píxels. En tots els casos les medianes estan desplaçades cap avall, indicant asimetria positiva. A diferència del mètode tradicional, el LiDAR concentra la major part dels valors en el 50 % dels casos centrals, i tant en la resolució de 8 com a la de 24 té dos valors atípics.

4.2.3. Fracció de cabuda coberta a nivell estrat

Tal i com s'ha explicat a l'apartat 4.2.3, la fracció de cabuda coberta (FCC) es va mesurar en les parcel·les i després es van extrapolar les dades a nivell de cada estrat. A la Taula 16 es presenten els resultats de l'extrapolació utilitzant el mètode tradicional i les dades que s'ha obtingut amb el mètode LiDAR per cada estrat. En aquest cas no hi ha diferents resolucions ja que la FCC en el mètode LiDAR és la mitjana del conjunt de píxels que queden dintre de cada estrat.

Taula 16. Fracció de cabuda coberta per cada estrat, obtinguda utilitzant el mètode tradicional i el mètode LiDAR.

Estrats	Superfície (ha)	FCC M.trad (%)	FCC LiDAR (%)
I	33,276	49	37
II	44,100	53	42
III	7,067	59	41
IV	1,934	53	59
V	1,845	80	77
VI	3,287	55	46

De l'anàlisi de regressió s'obté la relació entre els dos mètodes a l'hora d'estimar la variable FCC a nivell d'estrats. A la Figura 31 es pot veure aquesta relació. El coeficient de determinació (R^2) dona una correlació moderada-alta positiva amb un valor de 0.694 i el pendent de la recta és molt pròxim a 1.

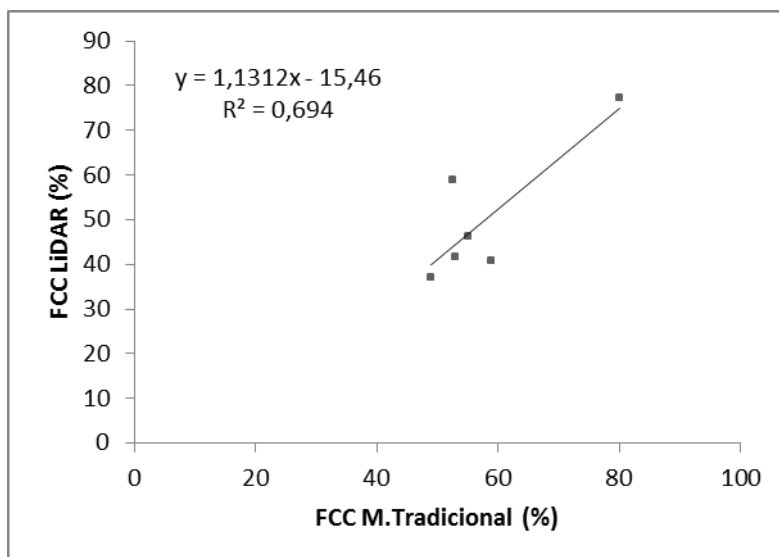


Figura 31. Relació entre la variable fracció de cabuda coberta (FCC) mesurada amb LiDAR i amb el mètode tradicional. Font: elaboració pròpia.

A partir de les dades obtingudes dels estrats s'ha realitzat l'anàlisi descriptiu de la Taula 17.

Taula 17. Estadístics de la variable FCC a nivell estrats.

FCC_ESTRATS	TRADICIONAL	LiDAR
Mida mostra	24	24
Mitjana	58,08	50,25
Variança	126,04	232,42
Desv. Estàndard	11,23	15,25
E. Típic de la mitjana	2,29	3,11
Coef. Var. (%)	19,33	30,34
Min.	49,00	36,91
Màx.	80,00	77,24

Les dades contenen un error absolut mig proper al 18 % i s'observa una subestimació de la FCC per part del mètode LiDAR com es pot veure a la Taula 18.

Taula 18. Errors en l'estimació de la variable FCC a nivell estrat. (EM) error mig, (EMA) error mig absolut, (PEMA) percentatge d'error mig absolut, (RMSE) error quadràtic mig, (E.típic) error típic.

	EM	EMA	PEMA	RMSE	E.típic
FCC_Estrats	-7,84	9,95	18%	11,07	9,43

La probabilitat associada a l'estadístic F, en la prova F-test, és 0.00, valor inferior al 0.05 del contrast d'hipòtesi, per tant es rebutja la hipòtesi nul·la i s'accepta l'alternativa que diu que el pendent és diferent de zero. Es pot afirmar que el model del LiDAR és vàlid, que els dos models estan linealment relacionats i el seu poder predictiu es pot avaluar amb un 69 % per al LiDAR.

De l'anàlisi de les mitjanes s'obté un resultat favorable, amb una significació de 0.886, valor per sobre del 0.05, amb el qual es pot acceptar la hipòtesi nul·la que diu que les mitjanes poblacionals són iguals.

Al gràfic de caixes i bigotis de la Figura 32, es veu com en els dos mètodes la mediana es troba desplaçada cap avall, com en anteriors casos, això vol dir una asimetria positiva. En el cas del LiDAR, sembla que les dades estiguin una mica més disperses, però en general, es veuen dues distribucions força semblants.

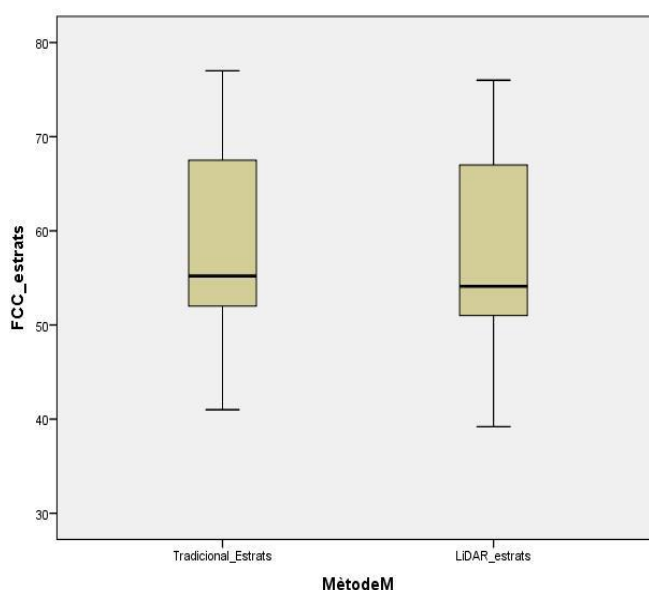


Figura 32. Gràfic de caixes i bigotis de la variable FCC a nivell d'estrats.

5. VALORACIÓ ECONÓMICA

S'ha realitzat un estudi comparatiu de preus amb la finalitat d'establir un paràmetre més en la comparació dels dos mètodes i definir una mica més, els avantatges o inconvenients de la tecnologia LiDAR en la seva utilització en l'àmbit forestal.

Per la realització de l'inventari a la finca La Vall s'han fet un total de 24 parcel·les i tal com s'ha explicat a l'apartat de material i mètodes, l'inventari de les mateixes es realitza amb parcel·les de radi 10 metres. Dintre de cada parcel·la es van mesurar els diàmetres de tots els arbres inventariables, aquells amb un diàmetre ≥ 7.5 cm, així com les alçades dels arbres més representatius. També es van agafar dades complementaries com el nombre de peus menors (arbres amb diàmetres < 7.5 cm), fracció de cabuda coberta de la part arbòria i de la part arbustiva.

A continuació es desglossen els costos per la modalitat inventari forestal, segons el mètode d'ordenació forestal, a partir de les tarifes del Col·legi Oficial d'Enginyers de Forest 2004 (Colegio Ingenieros de Montes, 2004) actualitzades a juny de 2011. A més també s'ha pres referències de tarifes comercials d'empreses del sector, com Balma Forestal SLP.

Taula 19. Preus de l'inventari tradicional. (Colegio Ingenieros de Montes, 2004)

Codigo	Descripción	Unidad	Precio
PR0045	Diseño de un inventario para la realización de un proyecto de ordenación de un monte de 5000 ha	ud	773,24 €
PR0043	Realización de un inventario exhaustivo para un proyecto de ordenación en un monte de 5000 ha. Trabajo de campo, medios y materiales necesarios.	ud	37.109,54 €
TOTAL			37.882,78 €

De la Taula 19 es dedueix que el cost de l'inventari tradicional suposa 7.5 €/ha en 2004; aplicant l'increment de l'IPC (índex de preus de consum) des d'aquest any fins el 2011, i segons l'INE (Institut Nacional d'Estadística), del 20 %, s'obté un preu de 9 €/ha.

Per calcular les despeses utilitzant el mètode de la tecnologia LiDAR s'estableixen uns costos fixos i altres variables en funció de la superfície inventariada, donat que el cost, tant de la creació dels MDT i MDS com del processat previ de dades LiDAR, disminueix proporcionalment a l'augmentar la superfície. A la Taula 20 es poden veure els trams de preus establerts per les empreses Balma Forestal SLP i Diemo 3D SL.

Taula 20. Cost per superfície pel processat de dades LiDAR en inventari. Font: Fabra *et al*, 2010a.

Concepto	50 – 200 ha	200 – 750 ha	750 – 4000 ha	>4000 ha
Creación MDT y MDS*	500€	0,90€/ha adicionales	0,75€/ha adicionales	
Procesado para inventario LiDAR**	400 €	+1,25 €/ha adicional	+1 €/ha adicional	+0,75 €/ha adicional

*Según tarifas comerciales de DIELMO 3D SL.

**Según tarifas comerciales de BALMA FORESTAL SLP

Fer un inventari cada 5 hectàrees és el que es considera habitual en un inventari tradicional, segons Fabra, encara que sempre depèn del tipus de forest. Amb la tecnologia LiDAR aquesta intensitat de mostreig es pot reduir fins una quarta part, donat que només cal anar a camp a fer petites comprovacions i calibrats (Fabra *et al*, 2010a).

Amb la tecnologia LiDAR es redueix l'inventari sistemàtic degut a que es recullen un nombre molt inferior de dades que amb el tradicional. Cal tenir en compte que la superfície de la finca estudiada en aquest treball és petita, si es compara amb les grans forest que es poden arribar a inventariar, on la intensitat de mostreig pot arribar a ser de 500 parcel·les.

A partir dels preus estipulats s'ha elaborat la Taula 21 per veure les diferències entre un mètode i l'altre.

Taula 21. Costos segons les fases de l'inventari

Concepte	INVENTARI TRADICIONAL	INVENTARI AMB LIDAR
Creació MDT	.	0,5 €/ha (a partir de 200 ha)
Processat LIDAR	.	Segons superfície *
Disseny inventari	0,2 €/ha	0,2 €/ha
Inventari de camp	40 €/inv	25 €/inv
Nombre d'inventaris	0,2 inv/ha	0,05 inv/ha
Inventari per ha	9 €/ha	1,25 €/ha
Total inventari per ha	9,2 €/ha	1,95 €/ha + processat(1,5€)*
Forest de 300 ha	2.760 €	1.035 €
Forest de 1500 ha	13.800 €	5.175 €

* El processat de les dades LiDAR varia en funció de la superfície com qualsevol processat cartogràfic. Fins i tot es pot establir orientativament uns trams de preus de mercat (Taula 22).

Taula 22. Preus orientatius de mercat amb la tecnologia LiDAR

Forest	50-250 (ha)	250-500 (ha)	500-1000 (ha)	1000-3000 (ha)
Preu	4,5 €/ha	3,5 €/ha	2,5 €/ha	1,5 €/ha

El que es pot deduir de la Taula 22 és que el LiDAR és més econòmic que el mètode tradicional com més gran és la superfície a inventariar. Es veu clar que a partir de superfícies de 250 ha, el preu per hectàrea comença a disminuir. També cal tenir en compte que el preu de fer volar un avió és molt elevat i com més gran sigui la superfície per sobrevolar més a compte sortirà. Per altre banda, és important considerar la gratuïtat de les dades LiDAR per part del Ministeri de Foment en el PNOA que farien disminuir considerablement els costos en inventaris.

6. DISCUSSIÓ

DENSITAT

En l'estimació de la variable densitat per part del mètode LiDAR, en les dues resolucions, s'han trobat diferències importants amb el mètode tradicional, degut sobretot a l'heterogeneïtat del bosc en quant a densitat de peus. En les parcel·les del mostreig s'ha pogut comprovar que amb el mètode LiDAR, a resolució de 24 píxels, es subestima la densitat considerablement.

Com s'ha presentat a la Taula 2 i segons van publicar Reyna *et al* (2010), la resolució de 24 píxels s'adapta millor a densitats baixes (<400 peus/ha) i la resolució de 8 píxels, s'adapta millor a densitats altes (>1200 peus/ha). El LiDAR disposa d'una resolució de 23 píxels, que resulta més òptima per densitats al voltant de 800 peus/ha. Com que en el moment de realitzar l'estudi, no es va disposar d'aquestes dades, es va considerar adient realitzar una tria de les dades obtingudes amb les resolucions de 8 i 24, de manera que el mètode s'adaptés millor a la densitat de les parcel·les. Es va decidir utilitzar la resolució LiDAR de 24 píxels, per densitats inferiors a 600 peus/ha i la resolució LiDAR de 8 píxels, per densitats superiors a 600 peus/ha. El resultat va millorar considerablement, com es pot veure a la Figura 22, amb un coeficient de determinació (R^2) de 0.68. Amb aquest resultat es pot afirmar que els dos mètodes estan linealment relacionats amb una correlació moderada positiva i un pendent de la recta de 0.65.

El resultat del contrast d'hipòtesi (F-test) és positiu, per tant es confirma la linealitat del model per l'estimació de la variable densitat, amb un poder predictiu del 68 %.

El percentatge d'error mig és del 36 % a nivell parcel·la, això suposa un error estàndard de 5.5 peus per parcel·la. El resultat és una subestimació de la densitat per part del mètode LiDAR. Aquest error no es pot atribuir al biaix de la mesura realitzada amb el mètode tradicional, donat que aquest consisteix en el recompte del total d'arbres directament de la parcel·la. Per tant, es pot interpretar que les diferències de l'ajust es deuen a l'estimació realitzada amb el mètode LiDAR.

Una altra raó per explicar aquesta diferència en l'estimació de la densitat pot ser el fet que amb la tecnologia LiDAR només es detecta l'estrat dominant de la massa, sense tenir en compte els arbres corresponents al sotabosc (Fabra *et al*, 2010b). Per altre banda, aquest fet és poc significatiu en termes generals, ja que aquests tipus de peus, en la majoria de casos, no aporten canvis substancials en altres variables dasomètriques com l'alçada o la FCC (Estornell, J. 2011).

Altre aspecte a considerar és que les dades LiDAR a més de donar informació sobre el nombre de peus, contenen informació sobre la ubicació de cada peu amb una precisió relativament alta (menys d'1m²), (Reyna *et al*, 2010). No obstant s'ha de tenir en compte que no sempre l'àpex de l'arbre es localitza en la mateixa posició que la seva base, especialment en peus inclinats. En el cas de peus molt inclinats, a més que la seva localització no sigui molt precisa, es pot donar el cas que el làser incideixi en dues parts del mateix arbre donant dos peus quan en realitat n'hi ha un.

Un aspecte important cal considerar és la densitat de punts del vol LiDAR. Densitats de punts més elevades donen més precisió, essent l'ideal 4-8 punts/m² per identificar arbres individuals (Kaartinen *et al*, 2008). La densitat de punts que s'ha disposat en aquest treball és de 0.5 punts/m², que és la densitat que utilitza el PNOA.

Quan l'estimació de la densitat es realitza en una superfície molt més gran, com són els estrats, el resultat de la regressió lineal entre els dos mètodes millora considerablement, amb coeficients de determinació $R^2= 0.97$ i $R^2= 0.96$ per resolucions de LiDAR a 8 i 24 píxels, respectivament.

Pel que fa als errors s'ha comprovat que, a l'ampliar la superfície d'estudi, aquests augmenten. En l'estimació de la densitat amb LiDAR a 24 píxels, l'error mig arriba al 75 %, molt per sobre de l'error del 27 % que dona el LiDAR a 8 píxels. Aquests errors es poden atribuir al mètode tradicional, ja que les dades obtingudes de les parcel·les, i que són representatives de tot l'estrat al que pertanyen, s'extrapolen a la superfície de l'estrat acumulant errors.

Finalment es conclou que les diferències que resulten de la comparació dels dos mètodes, el tradicional i el LiDAR, estadísticament no són significatives. Per tant, es pot afirmar que els resultats en l'estimació de la densitat no depenen del mètode utilitzat, sempre i quan, s'utilitzi la resolució adequada en el mètode LiDAR.

ALÇADA

Analitzant les dades obtingudes, per l'estimació de la variable alçada, les diferències trobades entre el mètode tradicional i el LiDAR en les seves dues resolucions de 8 i 24 píxels, no semblen rellevants.

En l'estudi de les regressions realitzat entre els dos mètodes d'estimació, tradicional i LiDAR i que es pot veure a la Figura 24 es pot observar que el mètode LiDAR es relaciona linealment al mètode tradicional, en l'estimació de la variable alçada. En quant a les diferències entre la utilització de la resolució de 8 o de 24 píxels en el mètode LiDAR, es pot afirmar que hi ha poques diferències, donat que la correlació obtinguda és alta i positiva, amb valors de $R^2= 0.75$ i $R^2= 0.77$ respectivament.

D'altra banda, el resultat del contrast d'hipòtesi (F-test) és positiu i dona com a vàlid el model lineal, tant en el cas de LiDAR amb resolució 8 píxels, com en el cas de LiDAR amb 24 píxels. Per tant els dos mètodes, tradicional i LiDAR, són vàlids en l'estimació de la variable alçada i el model lineal té un poder predictiu del 75 % per la resolució LiDAR de 8 píxels i del 77 % per la resolució LiDAR de 24.

Pel que fa als errors, tampoc s'observen grans diferències. A la Taula 9 es veu com el mètode LiDAR amb 24 píxels, dona una millor aproximació al mètode tradicional, amb un error mig del 10 %, front el 15 % del LiDAR amb 8 píxels, això representa una diferència d'alçada entre 1 i 1.9 metres, sobre 12 metres de mitjana. Per tant es pot afirmar que la resolució de 24 píxels dona una millor estimació de l'alçada.

En altres estudis s'ha demostrat que la correcta estimació de l'alçada depèn de l'espècie de l'arbrat, presentant un major error les espècies amb un port piramidal que d'altres menys piramidals, amb errors compresos entre 0.5 i 1 metre per *Pinus ponderosa* i *Abeto Douglas* (Andersen *et al*, 2004). Per corregir aquest error, alguns autors com Fabra (2010b) recomanen incrementar l'alçada en 0.7 metres directament sobre l'alçada obtinguda amb LiDAR.

Els errors en l'estimació d'aquesta variable poden ser deguts, per una banda a les errades pròpies del mètode tradicional en el moment de prendre les mesures d'alçada i per una altra banda a les errades pròpies de l'estimació que realitza el LiDAR. Els errors que es deriven de l'estimació de l'alçada en l'inventari tradicional, els determina la precisió del propi aparell de mesura (hipsòmetre Vèrtex IV) i la

tecnologia que utilitza, ja que l'emissió d'ultrasons es pot veure afectada per condicions ambientals com la humitat, el vent, etc. A més d'aquests errors de l'aparell de mesura, s'han d'afegir els que realitza la persona que fa la mesura. Segons Reyna *et al*, (2010), els errors d'aquests aparells són molt baixos i es situen al voltant del 2-5 % (això suposa 0.6 m considerant una alçada mitjana de 12 m).

Pel que fa a l'error que presenta l'estimació de l'alçada amb el mètode LiDAR, d'acord amb Suárez *et al*, (2005), una comparació entre les prediccions de LiDAR i les mesures realitzades a camp amb el mètode tradicional, subestima les mesures de l'alçada individual dels arbres en un 7-8 %, el que no difereix excessivament dels resultats obtinguts en aquest cas (error del 10 %).

Quan l'estimació de l'alçada es realitza a una superfície més gran, els estrats, s'ha comprovat que, igual que amb l'estimació de la densitat, a l'ampliar la superfície d'estudi, els error residuals augmenten. En l'estimació de l'alçada amb LiDAR a 8 píxels, l'error mig arriba al 27 % i amb el LiDAR a 24 píxels és del 21 %. En canvi la correlació entre els dos mètodes es manté, ($R^2= 0.75$) en el cas del mètode LiDAR a 8 píxels i augmenta ($R^2= 0.81$) en el cas del mètode LiDAR a 24 píxels.

Finalment, es conclou que el mètode LiDAR, en les dues versions, a 8 píxels i a 24 píxels, subestima l'estimació de la variable alçada, i aquesta subestimació no varia si s'augmenta la superfície estudiada. Encara que les diferències existents entre les dues resolucions estudiades del mètode LiDAR, no siguin significatives estadísticament, es pot afirmar que el mètode LiDAR amb una resolució de 24 píxels, s'ajusta millor al mètode tradicional a l'hora d'estimar la variable alçada en un inventari forestal.

FCC

L'estimació de la fracció de cabuda coberta s'ha dut a terme només per la superfície dels estrats, degut a que l'estimació d'aquesta variable amb el mètode LiDAR es realitza amb la mitjana del conjunt de píxels que queden dintre de cada estrat.

El resultat de la regressió lineal és una correlació moderada-alta, amb un coeficient de determinació $R^2= 0.69$ i un pendent molt pròxim a 1.

El resultat del contrast d'hipòtesi (F-test) ha estat positiu i dona com a vàlid el model lineal. Es dedueix llavors, que les diferències observades entre els dos mètodes, tradicional i LiDAR, no són significatives estadísticament; per tant, tots dos mètodes són vàlids en l'estimació de la variable FCC i es pot afirmar que el model lineal té un poder predictiu del 69 %.

Pel que fa als errors, en els resultats obtinguts a la Taula 19 s'observa una subestimació de la variable FCC per part del mètode LiDAR i un error mig del 18 %. En aquest cas cal plantejar el fet de que l'estimació realitzada amb LiDAR fos més propera a la realitat que el propi mètode tradicional. Amb el densitòmetre es realitza una observació de 50 punts per parcel·la (0.16 punts/m²) i la mesura realitzada amb LiDAR, té una precisió de 0.5 punts/m².

7. CONCLUSIONS

Actualment l'ús de la tecnologia LiDAR, per aplicacions en inventari forestal i silvicultura, no està generalitzat, degut sobretot a la dificultat d'adquisició de dades i el seu processat posterior per la seva aplicació en la gestió forestal. La disponibilitat de dades LiDAR que facilita el Ministeri de Foment Espanyol en el PNOA, és una oportunitat pel sector forestal d'aprofitar aquesta tecnologia per millorar l'inventari forestal i altres aplicacions del sector.

En aquest treball s'ha mostrat la utilitat de la tecnologia LiDAR a l'hora d'estimar les variables de densitat, alçada i fracció de cabuda coberta que caracteritzen un inventari forestal.

Per la variable densitat, en l'estudi realitzat s'ha pogut comprovar que l'estimació del mètode LiDAR millora en superfícies grans com els estrats; al contrari que el mètode tradicional, que acumula errors degut a la inferència estadística. L'estimació de la densitat en aquest cas, ha resultat subestimada en un 36 %. Aquest resultat indica la importància d'utilitzar una resolució de píxels adequada per part del mètode LiDAR. També s'interpreta aquest resultat com una acumulació d'errors en els càlculs per part del mètode tradicional, degut a que les dades en aquest mètode són extrapolades des de les parcel·les als estrats. En canvi en el mètode LiDAR les dades són en continu.

Els resultats de l'estimació de la densitat amb el mètode LiDAR podrien millorar amb densitats de punts superiors. Probablement, en un futur, el Ministeri de Foment es podria plantejar la possibilitat d'augmentar la densitat de punts dels vols realitzats en el PNOA, per tal de millorar la precisió en les estimacions futures de les aplicacions forestal.

Per la variable alçada els resultats obtinguts amb LiDAR mostren una subestimació de la variable, tant en les parcel·les com en els estrats. Aquest resultat es considera que és degut a la baixa probabilitat de que un punt LiDAR coincideixi exactament amb el punt més alt d'un arbre. En aquest treball aquesta diferència d'alçada ha resultat ser entre 1 i 1.9 metres. S'ha considerat que part de l'error és degut a l'estimació en el mètode tradicional, derivat de la dificultat de visualitzar la copa dels arbres des del terra.

Tenint en compte els aspectes comentats i que el mètode LiDAR proporciona informació relativa a l'alçada de tots els arbres en continu, mentre que el mètode tradicional proporciona dades d'una mostra i després s'extrapolen les dades; s'ha arribat a la conclusió que realitzant les correccions de l'alçada corresponents a cada espècie, el mètode LiDAR representa una millora en la precisió de l'estimació de l'alçada reduint els errors d'estimació per aquesta variable.

La variable fracció de cabuda coberta (FCC), s'ha estudiat a nivell dels estrats, per tant, en el mètode tradicional s'han acumulat els errors d'extrapolar les dades obtingudes des de les parcel·les als estrats. En canvi, en el mètode LiDAR les dades són en continu. El resultat ha estat una subestimació de la FCC per part del mètode LiDAR, poc significativa estadísticament, per tant, es considera el mètode LiDAR tant vàlid com el tradicional a l'hora de realitzar estimacions de la FCC en un inventari forestal.

En quant a la part econòmica, l'ús de la tecnologia LiDAR suposa una reducció important en el cost econòmic de la realització d'un inventari forestal, essent aquesta reducció més gran a l'augmentar la superfície de l'inventari, fet que es tradueix proporcionalment en una reducció dels costos totals. Encara que per superfícies petites, com la finca d'aquest estudi, pugui resultar més car degut als costos fixos, a partir d'aproximadament 300 ha el cost comença a disminuir respecte de l'inventari tradicional.

L'aplicació de la tecnologia LiDAR encara és incipient, però sembla ser que la precisió en els resultats anirà augmentant conforme s'obtinguin més dades per anar testant i calibrant els models, amb la qual cosa els errors es podran disminuir per cada tipus de bosc i d'espècie.

8. BIBLIOGRAFIA

Andersen, H-E., Reutebuch, S., McGaughey, R.J., 2006. Forest measurement and monitoring using high-resolution airborne LiDAR (SAF), North Puget Sound Chapter Meeting. June 14, Mount Vernon, WA. Accesible a: <http://forsys.cfr.washington.edu/> (23/03/2012).

Andersen, H.-E., Schreuder, G.F., Agee, J., McGaughey, R.J., Reutebuch, S.E. 2004. Canopy fuels measurement with LiDAR and IFSAR. Joint Fire Science Program (JFSP) Principal Investigator's Workshop, April 13-15, 2004, Phoenix, Arizona. Accesible a: <http://forsys.cfr.washington.edu/> (20/03/2012).

Castelló, J.I., Sarri, R., Riera, J. 2001. Gestió forestal. Gestió associada de boscos privats i estudis tècnics de les zones cremades els anys 1994 i 1998. Agència local de desenvolupament forestal.

Cerrillo, A. 2010. Formato LAS, el estándar de datos LiDAR. 18 Nombre 2010. Accesible a: <http://lidar.com.es/2010/11/18/formato-las-el-estandar-de-datos-lidar/> (07/05/2012).

Colegio de Ingenieros de Montes. 2004. Cuadro de precios. Ed. Colegio Ingenieros de Montes, 2004.

CPF, 2010. Manual de redacció de plans tècnics de gestió i millora forestal (PTGMF) i plans simples de gestió forestals (PSGF). Instruccions de redacció i l'inventari forestal. CPF.

Davara, F., Cuasante, D. 2008. Inventario forestal mediante tecnología LiDAR. Accesible: http://www.conama9.org/conama9/download/files/GTs/13215072_ppt_FDava.pdf (23/04/2012).

Delgado, R., 2007. Probabilidad y estadística para ciencias e ingenierías. Ed.Delta. 2007, Madrid.

Delgado, R. 2008. Apuntes de Dasometría. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Valencia, 2008.

Dielmo 3D SL, 2012. DielmoLiDAR. Accesible a: www.dielmo.com (15/01/2012).

Estornell, J. 2011. Análisis de los factores que influyen en la precisión de un MDE y estimación de parámetros forestales en zonas arbustivas de montaña mediante datos LiDAR. Universitat Politècnica de València.

Fabra, M., Garfella, M. 2010a. Aplicaciones de la tecnología LiDAR al sector forestal y comparación de costes frente a metodologías tradicionales (No publicat).

Fabra, M., Mola, B., Garcia, J.C., Poveda, A. 2010b. XERRAC - A software for the application of LiDAR to forest fire risk and fuel maps analysis. Forestsat2010. Santiago de Compostela, 08/09/2010.

Fabra, M., Poveda, A., Mola, B., Reyna, S. 2011. Assessment of stand estimates of Pinus halepensis Mill plantations based on low density LiDAR data (No publicat).

Garcia, J.C. 2009. DielmoOpenLiDAR: control de calidad de datos LiDAR y generación de productos finales. III JORNADAS DE SIG LIBRE. Servei de Sistemes d'Informació Geogràfica i Teledetecció. Universitat de Girona. Girona Març 2009.

INEGI, 2012. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Accesible a: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/lidar.aspx> (10/05/2012).

Instituto Geográfico Nacional, 2012. Plan Nacional de Ortofotografía aérea. Accesible a: <http://www.ign.es/PNOA/> (11/03/2012).

Kaartinen, H., Hyypä, J. 2008. Tree extraction. European Spatial Data Research. Official publication n°53. 2008.

López, P., Lozares, C. 1999. Anàlisi bivariàble de dades estadístiques. Universitat Autònoma de Barcelona. Servei de Publicacions. Bellaterra, 1999.

Reyna, S., Fabra, M., Poveda, A. 2010. Programa de mejora de la capacidad de adaptación al cambio climático de los bosques de la Comunidad Valenciana. Generalitat Valenciana. Universidad Politécnica de Valencia (No publicat).

Ruiz, L.A., 2009. Estimación de la Fracción de Caida Cubierta mediante datos LiDAR. III Asamblea SIOSE y Jornada Técnica. Universidad Politécnica de Valencia. Madrid, 25 març 2009.

S.E.C.F (sociedad Española de Ciencias Forestales), 2005. Mundi Prensa Libros. Madrid.

Serrada, R. 2008. Apuntes de selvicultura. Servicio de Publicaciones. EUIT Forestal. Madrid, 2008.

Servei Meteorològic de Catalunya, 2012. Climatologia. El Baix Ebre. Accessible a: <http://www20.gencat.cat/portal/site/meteocat/menuitem.0733ee5bfae8638c5c121577b0c0e1a0/?vgnextoid=335c5cef6aee2210VgnVCM1000000b0c1e0aRCRD&vgnnextchannel=335c5cef6aee2210VgnVCM1000000b0c1e0aRCRD&vgnnextfmt=default> (03/05/2012).

Suárez, J.C., Ontiveros, C., Smith, S., Snape, S., 2005. Use of airborne LiDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry. Computers & Geosciences 31 pp. 253-262.