



■ Pekka Hyvönen



■ Anssi Pekkarinen



■ Sakari Tuominen

Pekka Hyvönen, Anssi Pekkarinen ja Sakari Tuominen

Ilmakuvasegmentteihin perustuvan kaksivaiheisen otannan luotettavuus puustotunnusten ei-parametrisessa estimoinnissa

Hyvönen, P., Pekkarinen, A. & Tuominen, S. 2007. Ilmakuvasegmentteihin perustuvan kaksivaiheisen otannan luotettavuus puustotunnusten ei-parametrisessa estimoinnissa. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2007: 39–53.

Tutkimuksessa tarkasteltiin ilmakuvasegmentteihin perustuvan kaksivaiheisen otannan luotettavuutta puustotunnusten ei-parametrisessa estimoinnissa. Aineistona oli kolmesta ilmakuvasta koostetun ortoilmakuvamosaiikin 10 alueelta mitattu segmenttiaineisto. Segmenttien lukumäärä oli 467 kpl, pinta-ala 163,8 ha ja keskimääräinen koko 0,351 ha. Segmentointi tehtiin ilmakuvan sävyarvojen perusteella. Segmentit paikannettiin ja niiden segmentti- ja puustotiedot tallennettiin tiedonkeruulaitteelle. Tiedonkeruulaitteessa käytettiin ilmakeu- ja segmenttiraja-aineistoa taustakarttoina sekä GPS-sijaintitietoa apuna paikantamisessa.

Segmenttien puustotunnusten estimaatit laskettiin segmenttien spektrisiä ominaisuuksia ja k-lähimmän naapurin (knn) menetelmää käyttäen ja niiden luotettavuutta tarkasteltiin ristiinvalidoinnilla. Käytännön sovellustilannetta jäljiteltiin simuloimalla otoksia sävyarvojen perusteella ositettuun segmenttiaineistoon. Otannan luotettavuutta tarkasteltiin ositteen keskitilavuuden keskiarvon keskivirheellä.

Estimoinnissa puustotunnusten suhteelliset keskivirheet vaihtelivat 36,8 %:n (keskiläpimitta) ja 156,3 %:n (lehtipuun tilavuus) välillä. Keskitilavuuden keskivirhe oli 55,1 %. Otannan simuloinnissa pienin keskitilavuuden keskiarvon keskivirhe 36,0 m³ ha⁻¹ saatiin ositemäärällä 40 ja käyttämällä otannassa suhteellista kiintiöintiä.

Tarkasteltu menetelmä havaittiin jatkotutkimuksen arvoiseksi, vaikka tarkkuus ei tämän tutkimuksen perusteella vielä riitä sovellettavaksi käytännön metsätaloudessa.

Asiasanat: kuvioittainen arviointi, metsävarat, segmentointi, otanta, inventointi, ilmakeuva
Yhteystiedot: *Hyvönen*, Metla, Joensuun toimintayksikkö, PL 68, 80101 Joensuu; *Pekkarinen*, Joint Research Centre of the European Commission, Institute of Environment and Sustainability, Land Management and Natural Hazards Unit, T.P.261, I-21020 Ispra (VA), Italy; *Tuominen*, Metla, Helsingin toimipaikka, Unioninkatu 40 A, 00170 Helsinki. Sähköposti pekka.hyvonen@metla.fi
Hyväksytty 8.1.2007

I Johdanto

Kuvioittainen arviointi on Suomessa jo pitkään kollut hallitseva metsätalouden suunnittelun tiedonkeruumenetelmä. Kuvioittaista arviointia on käytetty sekä inventointi- että metsätalouden järjestelymenetelmänä (Poso 1983). Kuvioittaisen inventointimenetelmän päävaiheet ovat: 1) ennakkokuviointi yleensä ilmakuvien pohjalta ja 2) kuviotietojen arviointi ja rajauksen tarkistaminen maastossa, jolloin arvioija käy jokaisella kuviolla. Kuvioittaisella arvioinnilla toteutetun tiedonkeruun tulokset tallennetaan yleensä metsätietojärjestelmään, jonka tietosisältö koostuu tyypillisesti kuvioiden sijainti- ja ominaisuustiedoista. Kuvioittaisen arvioinnin merkittävänä etuna on se, että se tuottaa metsätalouden suunnittelun vaatimat toimenpideyksiköt ja toimenpidesuosituksen. Tähän liittyy myös kuvioittaisen arvioinnin merkittävä ongelma: kuviot rajataan lähinnä toimenpideyksiköinä eikä puusto- ja kasvupaikkatunnuksiltaan homogeenisinä metsiköinä. Lisäksi metsänhoito- ja hakkuutoimenpiteet eivät useinkaan noudata kuvioiden rajausta, mikä vaikeuttaa kuvioiden käyttöä suunnittelujaksoa pidempiaikaisessa metsävarojen seurannassa (Hyvönen ja Korhonen 2003). Edelleen, kuvioiden rajaus on subjektiivista, ja metsikkökuvio on jo käsitteenä epämääräinen. Siten eri henkilöiden samalle alueelle tekemät kuvioinnit voivat poiketa toisistaan huomattavasti, koska ns. oikeaa kuviointia ei voida objektiivisesti määrittellä.

Alueelliseen metsäsuunnitteluun suunnatut voimavarat ovat nykyisellään rajalliset suhteessa kerättävään tietomäärään. Kuvioittainen arviointimenetelmä on luonteeltaan maastotyöntensivistä ja siten kustannuksiltaan inventoitua pinta-alaa kohti kallista. Lisäksi menetelmän tehostaminen muutoin kuin arviointitarkkuutta heikentämällä ei sen luonteesta johtuen ole juuri mahdollista. Toisaalta alueellisen metsäsuunnittelun kattavuus pyritään säilyttämään vähintäänkin entisellään. Kansallisessa metsäohjelmassa on yhdeksi tavoitteeksi asetettu tilakohtaisten metsäsuunnitelmien määrän nostaminen 75 %:iin yksityismetsien pinta-alasta (Kansallinen Metsäohjelma... 1999). Tähän tavoitteeseen pääsemiseksi on maastossa tapahtuvaa tiedonkeruuta tehostettava. Keinoja metsäninventoinnin tehostamiseen sekä kuvioarvioinnin subjektiivisuuden vähentämiseen

voisivat tarjota esimerkiksi kaukokartoitustiedon käytön lisääminen sekä otannan käyttö inventoinnin maastotyön kohdentamisessa. Tämänkaltaisen inventointimenetelmän inventointiyksikkönä voidaan käyttää esimerkiksi kaukokuvien automaattisella segmentoinnilla tuotettuja kuvasegmenttejä. Segmentoinnissa tarkoituksena on jakaa inventoitava alue aputietona käytettävän kaukokuvan (esim. numeerinen ilmakuva) avulla toisensa poissulkeviin, spatiaalisesti yhtenäisiin ja sisäisesti homogeenisiin yksiköihin, so. segmentteihin.

Segmenttien tehokas käyttö varsinaisessa inventointitiedon tuottamisessa edellyttää sitä, että niiden tietosisältö voidaan selvittää suhteellisen pienellä maasto-otoksella. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi kaksivaiheisen otannan avulla. Ilmakuvatulkintaa on sovellettu aikaisemmin kaksivaiheisen koelaotannan yhteydessä esimerkiksi 5. valtakunnan metsien inventoinnissa Pohjois-Suomessa (Poso ja Kujala 1971). Kaksivaiheinen otanta perustuu siihen, että inventoinnin eri vaiheissa käytetään samanlaista otosyksikköä, mutta toisen vaiheen otokseen poimitaan vähemmän yksiköitä. Kaksivaiheiseen otantaan perustuvissa metsäninventointisovelluksissa on ensimmäisen vaiheen tietona tyypillisesti käytetty kaukokartoitustietoa ja toisen vaiheen tietona maastomittauksia. Kaksivaiheisen otannan käyttö on perusteltua silloin, kun (esim. Tuominen ym. 2006):

- a) ensimmäisen vaiheen tiedon hankkiminen on edullisempaa kuin toisen vaiheen tiedon
- b) toisen vaiheen tieto on tarkempaa kuin ensimmäisen vaiheen tieto
- c) ensimmäisen ja toisen vaiheen tieto ovat korrelaatioissa keskenään.

Kaukokartoituskuvioiden segmentointia ja segmenttipohjaista puustotunnusten estimointia on kokeiltu mm. keskiresoluution satelliittikuvilla ja korkean resoluution ilmakuvilla. Esim. Mäkelä ja Pekkarinen (2001) sekä Hyvönen (2002) ovat tutkineet Landsat TM -satelliittikuvan ja Pekkarinen (2002b) sekä Pekkarinen ja Tuominen (2003) ilmakuvan käyttöä segmentoinnin perustana. Näissä tutkimuksissa puustotunnusten estimoinnissa käytetty maastoaineisto oli kerätty joko metsikkökuvioilta tai koaloilta. Samoin estimoinnissa käytetyt kaukokuvapiirteet oli irrotettu joko metsikkökuvioilta tai koaloilta. Metsikkökuvio on kuitenkin usein puustoltaan hete-

rogeeninen eikä siksi ole välttämättä paras yksikkö piirreirrotukseen. Samoin koealan ympäriltä yhden tai useamman pikselin muodostamasta ikkunasta irrotetut kuvapiirteet voivat sisältää muiden kuin sen kuvion piirteitä, jolla koealan keskipiste sijaitsee, varsinkin jos keskimääräinen kuviokoko on pieni suhteessa kuvamateriaalin spatiaaliseen resoluutioon. Toisaalta yhden pikselin alueelta irrotettuihin piirteisiin vaikuttavat voimakkaasti mahdolliset sijaintivirheet koealan paikantamisessa joko kovalta tai maastossa. Edellä mainittujen syiden vuoksi puustotunnusten estimoinnin tarkkuus onkin ollut pääosin alle kuvioittaiselle arvioinnille asetettujen tarkkuusrajojen (Utterä ym. 2002).

Segmentointi tuottaa yleensä metsikkökuvioita pienempiä ja homogeenisempia yksiköitä (esim. Hagner 1997, Pekkarinen 2002a). Tämän vuoksi sekä piirteiden irrotus että maastoaineiston kerääminen tulisi tehdä segmenteiltä. Tällöin piirteet ja puustotunnukset vastaavat todennäköisesti paremmin toisiaan. Toisaalta, segmenttejä voidaan myös käyttää metsikkökuvioiden muodostamiseen ja kuvioiden metsikkötunnusten estimointiin. Ongelmana pinta-alaltaan pienten segmenttien mittaamisessa on pidetty niiden paikantamista sekä todennäköisesti alhaista maastotyön tuottavuutta ja tätä kautta soveltuvuutta käytännön metsätalouteen.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kuinka luotettavasti metsikkötason puustotunnukset voidaan estimoida kaksivaiheista otantaa, ilmakuvasegmenttejä, segmentteittäin kerättyä maastoaineistoa ja ilmakuvilta irrotettuja spektrisiä piirteitä käyttäen.

Toisena tavoitteena oli selvittää segmenttipohjaisen lähestymistavan soveltuvuutta käytännön inventointiin. Lisäksi työssä tarkasteltiin ilmakuvan sävyarvojen korjauksen vaikutusta puustotunnusestimaattien tarkkuuteen.

2 Aineisto

2.1 Tutkimusalue

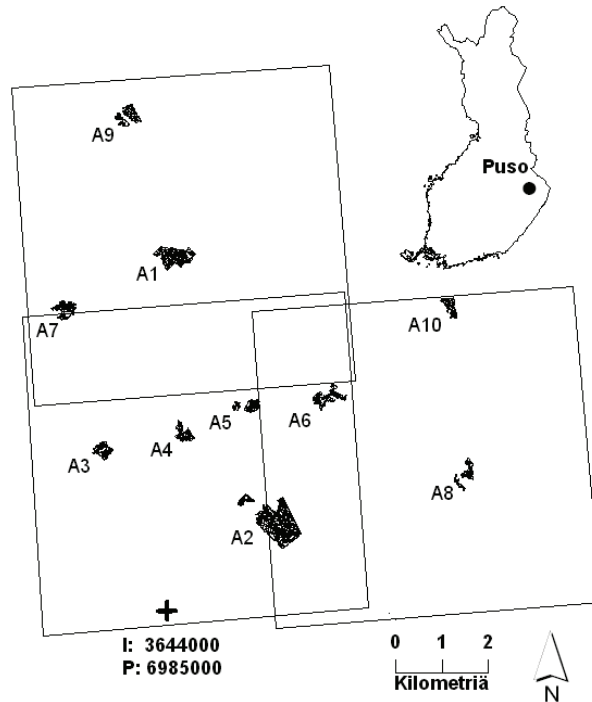
Tutkimusalue koostui kymmenestä erillisestä alueesta (A1–A10), jotka sijaitsevat Metsäkeskus Pohjois-Karjalassa Kontiolahden kunnassa Puson kylässä lähellä Kolin Kansallispuistoa (kuva 1). Tutkimusalueen metsät olivat pääosin havupuuvaltaisia sekametsiä. Tutkimusalueen metsien kehitysluokat vaihtelivat taimikoista uudistuskypsiin metsiin. Vallitsevat kehitysluokat olivat nuoret ja varttuneet kasvatusmetsät. Tutkimusalueen korkeus vaihteli välillä 95–300 metriä merenpinnan yläpuolella. Koealoista 7 % sijaitti yli 200 metrin korkeudella ja 76 % 150–200 metrin korkeudella. Tutkimusalueiden keskeisimmät segmentti- ja puustotunnukset on esitetty taulukossa 1.

2.2 Kuvamateriaali

Tutkimusalueelta hankittiin kolme vääräväri-ilmakuvaa, jotka oli kuvattu 29.7.2001. Ilmakuvien rajat

Taulukko 1. Tutkimusalueiden keskeisimmät segmentti- ja puustotunnukset.

Tunnus	Alue									
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Segmenttejä, kpl	98	122	34	25	31	35	30	32	30	30
Kivennäismailla–soilla, kpl	73–25	94–28	31–3	23–2	19–12	33–2	25–5	27–5	25–5	30–0
Pinta-ala, ha	23,8	53,6	11,0	15,8	7,5	10,2	13,4	8,5	9,8	10,2
Ikä, a	50,1	64,3	39,9	76,3	34	39,3	64,0	41,1	56,3	53,8
Pohjapinta-ala, m ² ha ⁻¹	18,8	18,9	11,9	21,6	15,1	11,9	16,0	16,3	15,9	22,2
Keskiläpimitta, cm	15,3	18,0	10,7	20,8	14,9	14,6	22,6	18,3	21,2	21,1
Keskipituus, m	11,9	13,4	8,8	16,0	12,1	11,6	18,1	15,7	13,4	18,1
Keskitilavuus, m ³ ha ⁻¹	138,4	148,9	80,0	178,1	100,8	90,7	159,8	121,6	111,7	202,3
Männyn keskitilavuus, m ³ ha ⁻¹	32,4	68,7	48,5	44,2	20,4	29,4	11,5	31,7	6,0	71,8
Kuusen keskitilavuus, m ³ ha ⁻¹	92,7	55,5	27,5	119,9	44,8	44,6	89,9	32,7	89,0	34,2
Lehtipuun keskitilavuus, m ³ ha ⁻¹	13,6	24,6	4,0	14,0	35,6	16,6	58,4	57,2	11,7	96,3



Kuva 1. Tutkimusalueiden A1–A10 sijainti käytettyjen ilmakuvien alueilla Pusossa.

on esitetty kuvassa 1. Kuvat skannattiin numeeriseen muotoon 14 μm resoluutiolla ja tallennettiin kolmekanavaiseen (lähi-infra, punainen ja vihreä) TIFF formaattiin. Skannatut kuvat orto-oikaistiin yhtenäiskoordinaatistoon käyttäen apuna numeerista korkeusmallia (25 m:n rasteri) ja peruskarttaa sekä maastossa GPS:n avulla paikannettuja tukipisteitä. Kuvien oikaisumallin kokonaisvirhe vaihteli välillä 3,3–4,8 m. Oikaistuista kuvista muodostettiin tutkimusalueen kattava ortoilmakuvamosaiikki (koko 11,0 km \times 11,7 km) 0,5 m:n maastoresoluutiolla.

2.3 Maastoaineisto

Puustotunnusten estimoinnissa käytetty maastoaineisto kerättiin kesien 2002 ja 2003 aikana. Koska tutkimuksen yhtenä tarkoituksena oli testata ilmakuvan sävyarvokorjauksen vaikutusta puustotunnusten estimoinnin tarkkuuteen, tutkimusalueet sijoitettiin ilmakuvamosaiikin eri osiin. Kesän 2002 aikana mi-

tatut alueet, A1 ja A2, sijoitettiin suoraan ilmakuvamosaiikille. Kesän 2003 mittauksen allokoinniseksi ja sopivien alueiden löytämiseksi koko segmenttiaineisto klusteroitiin 400 ositteeseen käyttäen segmenttien sävyarvojen keskiarvoja ja hajontoja sekä k -means-algoritmia (MacQueen 1967). Maastotiedon keruun tehostamiseksi työt kohdennettiin alueille, joilla ositteiden lukumäärä pinta-alayksikköä kohden oli suuri. Tätä tarkasteltiin 25 hehtaarin (500 m \times 500 m) ruuduissa. Mittaukset kohdistettiin kahdeksalle sellaiselle ruudulle jossa ositteiden määrä oli vähintään 20 kpl. Mitattavat osa-alueet valittiin näiden ruutujen sisältä siten, että ne sisälsivät mahdollisimman usean ositteen vierekkäin sijaitsevia segmenttejä sekä edustavan otoksen ositteista.

Inventointiyksikkönä käytettiin segmenttejä, joille sijoitettiin niiden homogeenisuudesta ja koosta riippuen 2–7 vaihtuväsiteistä relaskoopikoealaa. Mitattujen koealojen lukumäärä perustui aikaisempaan tietoon siitä, että metsäsunnittelussa käytettävän kuvion tarkkojen puustotunnusten estimointi edellyttää sen koosta

riippuen n. 5–10 koealan mittaamista (Laasasenaho ja Päivinen 1986). Segmenteillä tarvittava koealamäärä arvioitiin tätä pienemmäksi, koska segmentit ovat tyypillisesti pinta-alaltaan metsikkökuviota pienempiä ja puustotunnuksiltaan niitä homogeenisempia. Mitattujen segmenttien keskimääräinen pinta-ala oli 0,351 ha ja niiden pinta-alan keskihajonta 0,296. Mitattujen segmenttien lukumäärä oli 467 kpl ja niille sijoitettiin yhteensä 1 523 koealaa.

Segmenttien vaihtelevan muodon ja pienen keskimääräisen pinta-alan vuoksi niiden paikantamiseksi ja mittaamiseksi maastossa käytettiin paikannuslaitetta ja karttatoiminnoilla varustettua tiedonkeruulaitetta. Paikantamisessa ja tiedonkeruussa käytetty ohjelmisto toteutettiin käyttäen MapLT-karttakomponenttia (GISnet MapBox 2002, Torttila 2003). Ohjelmisto koostuu karttapohjaisesta käyttöliittymästä ja tiedonkeruusovelluksesta. Ohjelmisto voi hyödyntää sekä rasteri- että vektorimuotoista aineistoa. GPS-vastaanottimen ollessa päällä mittajaan sijainti maastossa näkyy tiedonkeruulaitteen näytöllä.

Käytetty tiedonkeruulaite oli Husky Fex21 (129 MHz, 32 MB RAM, 6,5" VGA). Käyttöjärjestelmänä oli MS Windows CE sekä MS Windows HPC 2000. Paikannuksessa käytetty GPS-vastaanotin oli Trimble NavGuide, jonka paikannustarkkuus on noin 5 metriä. Sijainnin differentiaalikorjausta ei käytetty mutta paikannuksen tarkkuutta kontrolloitiin vertaamalla sijaintia maastossa näytöllä esitettyyn sijaintiin. Koska yksittäiset samasta kohdasta tallennetut GPS-sijaintipisteet saattavat poiketa toisistaan huomattavasti, koealan sijaintipiste tallennettiin vasta sen jälkeen, kun GPS-koordinaatit pysyivät samoina.

Jokaisella koealalla mitattiin silmävaraisen kuviointaisen arvioinnin tapaan puuston keskiläpimitta, keskipituus, keski-ikä sekä pohjapinta-ala tai runkoluku hehtaaria kohden puulajeittain ja jaksoittain (SOLMU. Metsäsuunnittelun... 2000). Lisäksi jokaisella segmentillä määritettiin segmenttikohtaisia tietoja kuten maaluokka ja kasvupaikka. Puustositteiden määrä segmenteillä vaihteli välillä 1–8, keskimäärin ositteita segmentillä oli 3,3. Maastossa mitattiin vain kohteet, joilla ei ollut tehty metsänhoidollisia toimenpiteitä ilmakuvien oton ja maastotöiden välisenä aikana. Alueen A2 maastomittauksen teki metsätieteiden opiskelija ja alueiden A1 sekä A3–A10 Metsäntutkimuslaitoksen kenttätöiden ammattilainen. Maastomittajilla oli myös ammat-

taitaitoa ilmakuvien visuaalisesta tulkinnasta. Tämä lisäsi osaltaan koealan paikantamisvarmuutta, koska mittaja pystyi todentamaan olevansa maastossa tiedonkeruulaitteen näyttämässä paikassa.

Koeala- ja segmenttikohtaiset puustotiedot johdettiin maastomittauksista MELA2002-ohjelmistolla (Redsven ym. 2002). Tutkimusalueiden (A1–A10) segmenttien määrät, pinta-alat ja puustotunnukset on esitetty taulukossa 1 sekä alueiden sijainti kuvassa 1.

3 Menetelmät

3.1 Ilmakuvien segmentointi

Tutkimusalueen ilmakuvamosaiikki segmentoitiin käyttäen Metsäntutkimuslaitoksessa kehitettyä kaksivaiheista menetelmää. Menetelmän ensimmäinen vaihe perustuu nk. ohjattujen puiden menetelmän ideaan (Narendra ja Goldberg 1980, Pekkarinen 2002a), ja siinä etsitään homogeeniset siemenalueet paikallisten reunanvoimakkuuksien avulla. Siemenalueiden tunnistamisen jälkeen ne kuvaelementit, jotka eivät kuulu niihin, liitetään siemenalueisiin vedenjakaja (watershed) -tyyppisen algoritmin avulla. Näin saatuja segmenttejä kutsutaan initiaalisegmenteiksi. Menetelmän toisessa vaiheessa initiaalisegmenttejä yhdistellään suuremmiksi yksiköiksi käyttäjän antamien pinta-ala- ja samankaltaisuusparametrien mukaisesti (Pekkarinen 2002b). Segmenttien yhdistely toteutetaan niin, että annettua minimikokoa pienemmät initiaalisegmentit liitetään sävyarvoltaan lähinnä samankaltaiseen naapurisegmenttiin. Segmenttien samankaltaisuutta mitataan niiden sävyarvojen keskiarvojen välisellä euklidisella etäisyydellä (kaava 1).

$$d(s_i, s_j) = \sqrt{\sum_{ch=1}^n (\bar{x}_{i,ch} - \bar{x}_{j,ch})^2} \quad (1)$$

missä

$d(s_i, s_j)$ = euklidinen etäisyys segmenttien i ja j välillä

$\bar{x}_{i,ch}$ = segmentin i sävyarvojen keskiarvo
kanavalla ch

n = kanavien lukumäärä

Taulukko 2. Tutkimusalueiden segmenttien sävyarvojen keskiarvot ja keskihajonnat. Ylempi rivi alkuperäinen ilmakuvamosaiikki ja alempi sävyarvokorjattu.

Kanava	Alue									
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
	Keskiarvo									
Lähi-infra	135,8	106,9	135,3	117,4	139,5	165,2	139,9	145,6	172,6	131,5
	105,3	98,5	92,4	96,4	149,8	118,8	110,0	120,6	104,5	119,6
Punainen	90,4	67,7	105,2	85,9	86,1	118,4	98,9	86,9	130,6	83,7
	79,6	83,2	105,6	80,1	79,0	88,1	98,6	67,6	85,1	70,7
Vihreä	123,4	84,4	134,2	114,6	112,8	149,1	126,9	112,4	161,4	112,9
	111,0	111,1	121,8	110,6	119,3	118,6	120,4	105,7	114,5	107,6
	Keskihajonta									
Lähi-infra	31,5	29,4	26,6	35,2	30,4	25,2	30,5	30,2	31,7	26,9
	29,7	33,4	22,4	35,1	37,4	21,8	28,5	30,1	23,3	29,4
Punainen	23,0	18,2	19,6	24,7	20,5	21,3	21,5	22,4	26,5	17,9
	31,5	35,5	28,2	36,3	30,4	24,6	31,9	29,4	26,8	24,8
Vihreä	24,9	22,4	20,0	27,2	23,8	21,3	22,6	26,5	25,0	20,6
	34,8	45,7	26,9	40,0	37,7	25,4	31,4	38,9	26,5	29,8

Segmentointia varten ilmakuvamosaiikin resoluutio muunnettiin 1 metriin ja sen sävyarvojen kontrastia pehmennettiin paikallisesti Gauss-suodatuksella. Resoluution muuttaminen ja kuvan suodattaminen on usein tarpeen erittäin korkean spatiaalisen resoluution aineistoa käytettäessä, jos segmenttien halutaan edustavaan metsikköä tai sen osaa yksittäisten puiden sijaan. (esim. Hyppänen 1996, Pekkarinen ja Tuominen 2003). Käytetyn suodatusikkunan koko oli 3×3 pikseliä, ja suodatusta iteroitiin 15 kertaa edellisen iteraation tulokuvan toimiessa aina seuraavan suodatuksen lähtökuvana.

Ensimmäisen ja toisen vaiheen segmentoinneissa testattiin eri parametreja mahdollisimman hyvän segmentointituloksen tuottamiseksi. Näiden testien ja aikaisempien kokemusten perusteella voidaan todeta, että segmentoinnin tuloksen kannalta ratkaisevin on toisen vaiheen yhdistelyssä käytettävä minimikokoparametri. Tässä työssä testattiin erilaisia segmenttien minimikokoja 100 ja 10000 pikselin väliltä ja segmentointien tuloksia tarkasteltiin visuaalisesti sekä tutkimalla segmenttien homogeenisuutta. Visuaalisella tarkastelulla selvitettiin segmentoinnilla tuotettujen rajojen sijaintitarkkuutta ja sitä, erottuivatko eri kehitysluokkiin kuuluvat naapurimetsiköt omiksi segmenteikseen. Myös segmenttien homo-

geenisuutta arvioitiin visuaalisesti sekä laskemalla segmenttien kanavakohtainen pinta-alalla painotettu varianssi (kaava 2) koko segmentoidulle alueelle.

$$\text{var}_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{A} * \text{var}_i \quad (2)$$

missä

n = segmenttien lukumäärä

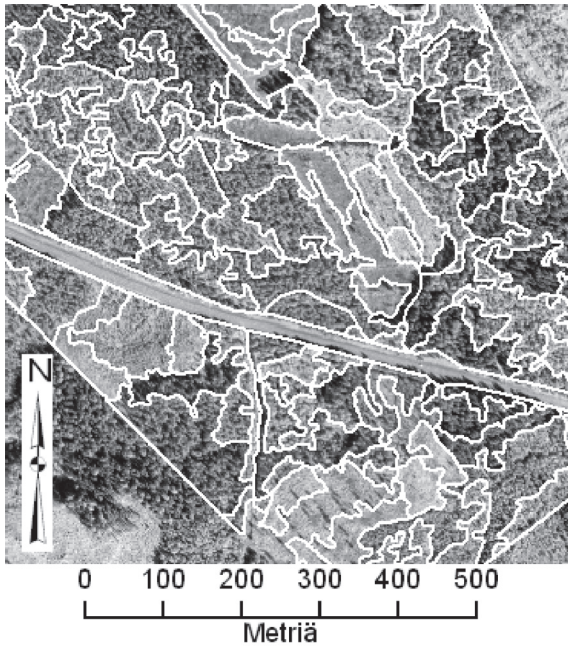
var_i = segmentin i varianssi

A_i = segmentin i pinta-ala

A = segmenttien pinta-ala

Käytettäväksi valittiin segmentointi, joka sekä visuaalisen tulkinnan että segmenttien homogeenisuuden perusteella arvioitiin onnistuneimmaksi (kuva 2). Onnistuneimmaksi arvioidussa segmentoinnissa minimikokoparametrin arvona käytettiin 1000:ta pikseliä (0,1 ha).

Puustotunnusten estimointia varten numeerisen ilmakuvamosaiikin sävyarvoja korjattiin epäsymmetrisen heijastuksen aiheuttaman sävyarvojen vaihtelun vähentämiseksi Metsäntutkimuslaitoksessa kehitetyllä menetelmällä, jossa epäsymmetrisen heijastuksen vaikutuksesta kuvan eri osissa sävyarvot korjataan referenssikuvan avulla metsikön tasolla re-



Kuva 2. Tutkimusalueen A2 mitattuja segmenttejä. Ilmakuva © Blom Kartta Oy.

ferenssikuvaa vastaaviksi (Tuominen ja Pekkarinen 2004). Referenssikuvana käytettiin Landsat 7 ETM-satelliittikuvaa, jossa epäsymmetrisen heijastuksen vaikutus sävyarvoihin on huomattavasti vähäisempi kuin ilmakuvilla.

3.2 Puustotunnusten estimointi

Segmenttien puustotunnukset estimoitiin k :n lähimmän naapurin menetelmällä (mm. Muinonen ja Tokola 1990, Tomppo 1990, Tokola ym. 1996). Lähimmät naapurit määritettiin segmenteille ilmakuvasta irrotettujen kuvapiirteiden välisen Euklidisen etäisyyden perusteella. Käytetyt kuvapiirteet olivat segmenttien sävyarvojen kanavakohtaiset keskiarvot ja keskiahjonat sekä alkuperäiseltä että sävyarvokorjatulta ilmakuvasta. Estimoinnissa lähimpiä naapureita painotettiin euklidisen etäisyyden käänteisluvun neliöllä (kaava 3).

$$\hat{y}_i = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{1}{d_i^2} y_i}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{d_i^2}} \quad (3)$$

missä

y_i = mitattu puustotunnus

\hat{y}_i = puustotunnuksen estimaatti

d_i = euklidinen etäisyys i :nneksi lähimpään naapuriin

k = naapurien lukumäärä

Estimoinnissa testattiin erilaisia k :n arvoja ja tarkasteltiin sen vaikutusta keskitilavuuden keskivirheeseen (RMSE) ja harhaan. Tämän tarkastelun perusteella havaittiin keskivirheen pienenevän selvästi k :n kasvaessa yhdestä seitsemään, jonka jälkeen keskivirhe ei merkittävästi pienentynyt. Myös harha pysyi lähes samalla tasolla eri k :n arvoilla. Myös esim. Tokola ym. (1996), Mäkelä ja Pekkarinen (2001) ja Pekkarinen (2002b) ovat tehneet samansuuntaisia havaintoja. Tämän perusteella puustotunnusten estimoinnissa käytettiin seitsemää lähintä naapuria.

Puustotunnusten estimaattien luotettavuutta arvioitiin käyttämällä ns. ristiinvalidointia, missä kunkin maastossa mitatun segmentin puustotunnukset estimoitiin muiden maastossa mitattujen segmenttien piirre- ja maastotietovektorien avulla. Puustotunnusten estimaattien tarkkuutta tarkasteltiin keskivirheen (kaava 4) ja harhan (kaava 5) avulla. Näistä laskettiin myös suhteelliset tunnusluvut jakamalla absoluuttinen arvo mitatulla keskiarvolla ja kertomalla se sadalla.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$\text{harha} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (5)$$

missä n on segmenttien lukumäärä.

Lisäksi keskitilavuuden estimoinnin luotettavuutta tarkasteltiin $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ja $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ tilavuusluokissa oikeinluokitusprosentin avulla (kaava 6). Siinä laskettiin oikein luokiteltujen osuus tilavuusluokittain sekä yli koko aineiston. Koska oikeinluokitusprosentti voi antaa liian optimistisia tuloksia, luokitustulosten vertaamiseksi laskettiin myös kappa-arvo, K (Rosenfield ja Fitzpatrick-Lins 1986)

$$\text{Oikeinluokitus-\%} = \frac{n_{\text{oikein}}}{n} * 100 \quad (6)$$

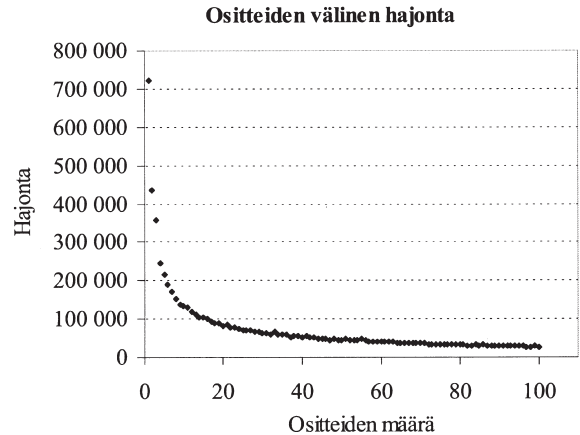
missä n_{oikein} on oikeaan tilavuusluokkaan estimoitujen segmenttien määrä.

3.3 Otannan simulointi

Vaikka edellä esitetty ristiinvalidointiin perustuva tarkastelu antaa hyvän kuvan aineiston ja menetelmän soveltuvuudesta puustotunnusten estimointiin, ei sen avulla voida hyvin arvioida menetelmän soveltuvuutta käytäntöön, koska vastaavan laajuisen maastoaineiston keruu olisi liian aikaa vievää ja kallista. Käytännön sovellustilanteessa inventoitava alue segmentoitaisiin ja segmentit jaettaisiin ositteisiin jonkin tai joidenkin kuvalta irrotettavien piirteiden avulla ja tämän jälkeen kustakin ositteesta mitattaisiin maastossa vain muutaman segmentin tiedot. Lopuksi mitattujen segmenttien tiedot yleistettäisiin samojen ositteiden lopuille segmenteille. Tässä työssä käytännön tilannetta jäljiteltiin simuloinnin avulla.

Käytännön toteutuksen simuloimiseksi segmenttiaineisto ositettiin segmenteiltä irrotettujen kuva-
piirteiden perusteella. Osittaminen tehtiin minimoimalla ositteiden välistä segmenttien sävyarvojen keskiarvoista ja -hajonnoista laskettua euklidisten etäisyyksien summaa. Koska käytännön toteutukseen tarvittavasta ositteiden määrästä ei ollut selvää ennakkokäsitystä, ositteiden määrän vaikutusta ositekeskiarvojen väliseen hajontaan tutkittiin eri ositemääriä käyttäen (kuva 3). Koska osituksen tavoitteena oli homogeenisten ositteiden muodostaminen ja ositemäärän pitäminen kohtuullisena käytännön sovellusta silmälläpitäen, päädyttiin 40, 50 ja 60 ositteeseen käyttöön. Kuten kuva 3 osoittaa, suuremmilla ositemäärillä ositteiden homogeenisuuden suhteellinen muutos on vähäinen ja lisäksi suuremmilla ositemäärillä olisi segmenttien lukumäärä ositteittain saattanut jäädä liian pieneksi.

Kustakin ositteesta poimittiin osa segmenteistä ja ositteelle laskettiin keskitilavuusestimaatti näiden poimittujen segmenttien tilavuuksien keskiarvona. Tätä estimaattia verrattiin ositteen kaikista segmenteistä laskettuun ositteen keskitilavuuteen. Mitattavien segmenttien määrä ositteessa laskettiin suhteellisella kiintiöinnillä (kaava 7), missä otoksen koko on suhteessa ositteen kokoon (mm. Cochran 1977, Kangas ym. 2003). Vaihtoehtoisena tapana käytettiin Neyman-kiintiöintiä (mm. Cochran 1977, Kangas ym. 2003) (kaava 8), missä otosyksiköiden määrä ositteessa oli suhteessa ositteesta laskettujen segmenttien kanavittaisten sävyarvojen summien



Kuva 3. Ositteiden piirrekeskiarvojen hajonta eri ositemäärillä.

keskihajontaan ja ositteen kokoon. Molemmat kiintiöinnit tehtiin kahdella tavalla. Ensimmäisessä vaihtoehdossa ositteesta valittiin vähintään yksi segmentti otokseen ja toisessa vaihtoehdossa vähintään kaksi.

$$f_h = \frac{n_h}{N_h} \quad (7)$$

$$n_h = n^* \frac{\frac{N_h * S_h}{N}}{\sum_{h=1}^L \frac{N_h * S_h}{N}} \quad (8)$$

missä

f_h = otantasuhde ositteessa h

n_h = otoksen koko ositteessa h

n = otannassa mitattavien segmenttien kokonaismäärä

N_h = ositteen h koko

N = aineiston koko

S_h = ositteen h kanavittaisten sävyarvojen summien keskihajonta

L = ositteiden kokonaismäärä

Otanta toteutettiin simuloimalla otoksia ositetuun segmenttiaineistoon. Otannassa jokaisesta ositteesta poimittiin satunnaisesti kiintiöinnin mukainen määrä segmenttejä ja kukin segmentti hyväksyttiin saman simuloinnin aikana otokseen vain kerran. Otannassa mitattavien segmenttien kokonaismääräksi asetet-

tiin 100. Tällä haluttiin varmistaa, että jokaisesta ositteesta tulisi vähintään yksi segmentti otantaan. Laskelmissa segmenttien kokonaismääräksi saattoi tulla yli 100, koska kiintiöinnistä (kaavat 7 ja 8) saatu tulos pyöristettiin lähimpään kokonaislukuun ja lisäksi toisessa vaihtoehdossa kaikista ositteista valittiin vähintään kaksi segmenttiä otokseen.

Osituksen onnistumista tarkasteltiin laskemalla ositteiden keskitilavuuden keskihajonnat koko aineistossa. Keskihajonta laskettiin myös painottamalla ositteen keskitilavuuden keskihajontaa ositteen suhteellisella pinta-alaosuudella.

Otannalla mitattujen segmenttien tiedon yleistämisen luotettavuutta tarkasteltiin laskemalla ositteittain keskitilavuuden keskiarvon keskivirhe (kaava 9) sekä ositteen pinta-alalla painotettu koko segmenttiaineiston keskiarvon keskivirhe (kaava 10).

$$s.e._h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^s (\bar{y} - \hat{y})^2}{s-1}} \quad (9)$$

$$s.e. = \sum_{h=1}^L \frac{A_h}{A} * s.e._h \quad (10)$$

missä

- $s.e._h$ = ositteen h keskitilavuuden keskiarvon keskivirhe
 $s.e.$ = pinta-alalla painotettu segmenttiaineiston keskitilavuuden keskiarvon keskivirhe
 s = simulointien lukumäärä ositteessa
 \bar{y} = ositteen keskitilavuus
 \hat{y} = simuloinnin keskitilavuus
 A_h = ositteen h pinta-ala
 A = ositteiden (=segmenttien) yhteinen pinta-ala

4 Tulokset

4.1 Puustotunnusten estimointi k - nn -menetelmällä

Alkuperäisen aineiston ristiinvalidoinnissa pienimmät suhteelliset keskivirheet olivat keskipituudella (36,8 %) ja keskiläpimitalla (37,6 %) (taulukko 3). Puulajeittaisten tilavuuksien suhteelliset keskivirheet olivat selvästi suuremmat kuin keskitilavuuden.

Sen sijaan niiden absoluuttiset keskivirheet olivat pienemmät kuin keskitilavuuden. Suhteelliset harhat vaihtelivat välillä $-7,3$ – $0,8$ %. Pienin absoluuttinen harha oli lehtipuun tilavuudella (0,2) ja suurin keskitilavuudella ($-5,9$).

Käytettäessä sävyarvokorjatulta ilmakuvulta haettuja piirteitä puustotunnusten estimointiin, suhteelliset keskivirheet olivat 1,0–20,1 prosenttiyksikköä suurempia kuin käytettäessä alkuperäiseltä ilmakuvulta haettuja piirteitä (taulukko 3). Sen sijaan suhteelliset harhat olivat sävyarvokorjatulla aineistolla muilla kuin lehtipuun tilavuudella 0,3–4,3 prosenttiyksikköä pienemmät kuin alkuperäisellä aineistolla.

Tarkasteltaessa estimoinnin luotettavuutta puhtaissa männiköissä (männyn osuus yli 80 % kokonaistilavuudesta, 79 segmenttiä) ja kuusikoissa (95 segmenttiä), tulokset olivat koko aineistoa selvästi paremmat. Keskitilavuuden suhteellinen keskivirhe oli puhtaissa männiköissä 2 prosenttiyksikköä pienempi ja kuusikoissa 19 prosenttiyksikköä pienempi kuin koko aineistossa. Myös muilla puustotunnuksilla suhteelliset keskivirheet olivat 2,8–12,6 prosenttiyksikköä pienemmät kuin koko aineistossa.

Tarkasteltaessa estimoinnin tarkkuutta tilavuusluokittain, havaittiin pienissä tilavuusluokissa estimoinnin aiheuttavan tilavuuden yliarviointia ja suurissa tilavuusluokissa aliarviointia (taulukko 4). Luokitustarkkuudessa ei juuri ollut eroa alkuperäisen ja sävyarvokorjatun aineiston välillä. Estimointi onnistui parhaiten niissä tilavuusluokissa, joissa oli eniten havaintoja. Koko aineiston oikeinluokitusprosentti oli $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ tilavuusluokkavälillä sävyarvokorjatulla aineistolla 36 % (taulukko 4) ja $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ tilavuusluokkavälillä 52,5 %.

4.2 Osittaminen ja otanta

Segmenttiaineiston osittamisessa ositteiden välinen segmenttien sävyarvojen keskiarvoista ja niiden keskihajonnoista laskettu ositteiden välistä hajontaa kuvaava tunnusluku pieni selvästi ositteiden määrän lisääntyessä (kuva 3). Arvioidun puuston keskitilavuuden keskihajonta koko segmenttiaineistossa pieni ositemäärän kasvaessa (taulukko 5). Pinta-alalla painottamattomat keskihajonnat olivat pienempiä kuin pinta-alalla painotetut arvot.

Taulukko 3. Puuston estimoinnin absoluuttiset (abs.) ja suhteelliset (%) keski-
virheet (RMSE) ja harhat ristiinvalidoinnissa ($k=7$). Ylempi rivi laskettu alkuperäi-
sellä ilmakuvamosaiikilla ja alempi sävyarvokorjatulla. (Keskiarvo koko aineiston
keskiarvo.)

Tunnus	Keskiarvo	RMSE		Harha	
		abs.	%	abs.	%
Ikä	53,5	22,0	41,0	-2,0	-3,6
		22,5	42,0	-1,4	-2,6
Pohjapinta-ala, $m^2 ha^{-1}$	17,4	7,6	43,5	-0,6	-3,4
		8,0	45,9	-0,2	-1,1
Keskiläpimitta, cm	17,3	6,5	37,6	-0,4	-2,3
		7,0	40,4	-0,4	-2,0
Keskipituus, m	13,5	5,0	36,8	-0,3	-2,2
		5,2	38,6	-0,3	-1,9
Keskitilavuus, $m^3 ha^{-1}$	135,6	74,7	55,1	-5,9	-4,4
		77,2	56,9	-2,1	-1,5
Männyn tilavuus, $m^3 ha^{-1}$	42,1	48,6	115,4	-3,1	-7,3
		50,2	119,2	-1,3	-3,0
Kuusen tilavuus, $m^3 ha^{-1}$	64,6	58,6	90,8	-3,1	-4,8
		65,4	101,3	-1,8	-2,8
Lehtipuun tilavuus, $m^3 ha^{-1}$	28,8	39,5	137,0	0,2	0,8
		45,0	156,3	0,5	3,5

Taulukko 4. Alkuperäisellä ja sävyarvokorjatulla aineistolla estimoidun keskitilavuuden oikeinluokitus
 $50 m^3 ha^{-1}$ luokissa.

Estimaatti	Tilavuusluokka, $m^3 ha^{-1}$							Yhteensä	Oikein, % (UA)
	0-50	50-100	100-150	150-200	200-250	250-300	>300		
Alkuperäinen aineisto									
0-50	65	9	3	0	0	0	1	78	83,3
50-100	42	23	13	8	2	2	0	90	25,6
100-150	9	21	44	17	5	4	3	103	42,7
150-200	5	10	18	17	12	6	3	71	23,9
200-250	2	4	9	8	9	11	11	54	16,7
250-300	3	1	4	5	12	14	18	57	24,6
>300	0	0	0	2	6	3	3	14	21,4
Yhteensä	126	68	91	57	46	40	39	467	
Oikein, % (PA)	51,6	33,8	48,4	29,8	19,6	35,0	7,7		37,5
Sävyarvokorjattu aineisto									
0-50	68	7	1	1	1	0	0	78	87,2
50-100	27	21	14	7	3	1	3	76	27,6
100-150	19	29	43	17	8	5	5	126	34,1
150-200	8	4	20	15	11	9	2	69	21,7
200-250	4	6	10	13	11	15	10	69	15,9
250-300	0	1	3	4	10	8	17	43	18,6
>300	0	0	0	0	2	2	2	6	33,3
Yhteensä	126	68	91	57	46	40	39	467	
Oikein, % (PA)	54,0	30,9	47,3	26,3	23,9	20,0	5,1		36,0

Taulukko 5. Puuston keskitilavuuden keskihajonta ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) segmenttiaineistossa eri ositemäärillä.

Ositteita	Puuston keskitilavuuden keskihajonta aineistossa			
	Alkuperäinen		Sävyarvokorjattu	
	Ei painotusta	Pinta-ala-painotus	Ei painotusta	Pinta-ala-painotus
40	68,4	69,6	67,5	69,1
50	65,9	67,1	67,3	68,9
60	63,4	65,3	65,9	67,9

Taulukko 6. Keskitilavuuden keskivirheet ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) segmenttiaineistossa eri ositemäärillä ja eri otantamenetelmillä. s.e.= keskivirhe, n= segmenttien määrä otannassa, n2suht= otoskoko kussakin ositteessa vähintään kaksi ja suhteellinen kiintiöinti, n1Ney= otoskoko kussakin ositteessa vähintään yksi ja Neyman-kiintiöinti.

	Ositteiden lukumäärä											
	40				50				60			
	Alkuperäinen		Sävyarvokorjattu		Alkuperäinen		Sävyarvokorjattu		Alkuperäinen		Sävyarvokorjattu	
	s.e.	n	s.e.	n	s.e.	n	s.e.	n	s.e.	n	s.e.	n
n2suht	36,0	109	35,3	110	38,1	115	37,8	115	39,2	128	40,7	125
n2Ney	36,7	113	37,9	111	37,7	119	38,3	120	38,0	136	40,3	132
n1suht	38,6	98	37,0	101	42,5	99	41,3	101	43,6	98	47,9	97
n1Ney	41,7	99	41,4	100	42,8	103	44,1	101	43,1	112	48,5	103

Otannan simuloinneissa koko aineiston keskitilavuuden keskiarvon keskivirhe vaihteli välillä 35,3–48,2 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ (taulukko 6). Keskivirhe kasvoi hivenen ositemäärän kasvaessa. Suhteellisella kiintiöinnillä saatiin vastaavaa Neyman-kiintiöintiä pienempi keskiarvon keskivirhe kahdeksassa tapauksessa ja Neyman-kiintiöinnillä vastaavaa suhteellista kiintiöintiä pienempi neljässä tapauksessa. Ositteiden lukumäärän ollessa 40 tai 50 suhteellisella kiintiöinnillä sävyarvokorjatulla ilmakuvasaiikilla saatiin pienempiä keskivirheitä kuin alkuperäisellä ilmakuvasaiikilla. Neyman-kiintiöinnillä tilanne oli päinvastoin. Ositteiden lukumäärän ollessa 60 alkuperäisellä ilmakuvasaiikilla saatiin pienempiä keskivirheitä kuin sävyarvokorjatulla. Kiintiöintitavalla ei ollut vaikutusta keskivirheeseen. Kun kiintiöintitapa ja ositemäärä olivat vakioita, keskivirhe pieneni otoskoon kasvaessa.

5 Tulosten tarkastelu

Segmentointiohjelma tuotti ensimmäisessä vaiheessa sävyarvoiltaan homogeenisia alueita. Relaskooppikoaloihin pohjautuvia maastomittauksia ei näillä segmenteillä olisi voinut toteuttaa niiden pienen pinta-alan vuoksi, joten niitä yhdisteltiin toisiinsa suuremmiksi kokonaisuuksiksi. Yhdistäminen perustettiin vain segmenttien kokoon ja spektriseen samankaltaisuuteen, eikä muotoa sääteleviä parametreja käytetty. Tämän vuoksi segmenttien muoto oli hyvin vaihteleva (kuva 2), eivätkä kaikki segmentit muotonsa vuoksi soveltuneet maastossa mitattaviksi. Segmentit säilyivät yhdistämisen jälkeenkin spektrisesti homogeenisina ja niiden sävyarvojen ja puustotunnusten korrelaatiot olivat vähintään samaa tasoa kuin aikaisemmissa vastaavissa tutkimuksissa (mm. Hagner 1997, Holopainen ja Wang, 1998, Hyvönen 2002).

Segmentteihin perustuva maastomittaus todettiin periaatteessa mahdolliseksi tutkimuksen aikana ke-

hitetyn tiedonkeruuohjelmiston avulla. Sen ja käytetyn laitteiston avulla pienten ja mutkikkaidenkin segmenttien paikantaminen onnistui nopeasti. Laitteen suorituskyky oli ohjelmistoon ja käytettyihin aineistoihin suhteutettuna rajallinen, mikä hidasti ohjelman käyttöä, tiedonsiirtoa ja kerättyjen tietojen tallennusta. Tämän lisäksi GPS signaalin heikkous saattoi välillä viivästyttää paikannusta jolloin myös mittaukseen tuli tauko. Koealan mittaukseen käytetty aika oli karkeasti arvioiden lähellä kuvioitaisen arvioinnin koealan mittauksen aikaa. Yhden koealan mittaukseen käytetty aika voitiin laskea koealatietojen mittauksen yhteydessä tallennetusta kellon ajasta. Sen perusteella segmenteillä, joissa oli mitattu vähintään kaksi peräkkäistä koealaa, oli keskimääräinen koealan mittausaika noin 8 minuuttia. Mitattua pinta-alaa aikayksikköä kohti kertyi vähän segmenttien pienenä takia. Esim. Kankaan ym. (2002) tutkimuksessa, jossa koealoilta mitattiin neljä puustotunnusta, vaihteli koealalla käytetty aika n. 5–13 minuutin välillä.

Parhaat tulokset puustotunnusten estimoinnissa saatiin keskipituudelle (RMSE 36,8 %) ja keskiläpimitalle (RMSE 37,6 %). Tulokset olivat hivenen parempia kuin Tuomisen ja Pekkarisen (2004) koealoihin ja osin samaan aineistoon (A1, A2) perustuneessa tutkimuksessa. Siinä sävyarvojen korjaus pienensi keskivirheitä huomattavasti, koska lähimmät naapurit haettiin eri kovalta kuin millä estimoitava koeala sijaitti. Tässä työssä sävyarvojen korjaus vaikutti vain pienentämällä harhaa muutamalla prosenttiyksiköllä. Selvästi erilaiset tulokset johtunevat juuri lähimpien naapurien hausta; tässä työssä hakua ei ollut rajoitettu ja lähimmät naapurit löytyivät todennäköisesti samalta alueelta.

Tutkimusalueet sijoitettiin tarkoituksellisesti ilmakuvien eri osiin ja puustoltaan vaihteleville alueille. Alueiden sisällä sekä välillä olikin suurta vaihtelua sekä puustotunnuksissa että sävyarvoissa (taulukot 1 ja 2). Tämä vaikutti todennäköisesti myös siihen, että tulokset olivat hivenen huonompia kuin aikaisemmissa kuvioihin perustuvissa tutkimuksissa. Esimerkiksi Anttilan (2002) tutkimuksessa keskitilavuuden keskivirhe oli 44,1 % ja Muinosen ym. (2001) 18–26 %. Molemmissa edellä mainituissa oli myös selvästi laajempi maastoaineisto käytettävissä kuin tässä tutkimuksessa, mikä osaltaan selittää paremmat tulokset. Sen sijaan Pekkarisen (2002a)

segmentteihin ja koealoihin perustuvassa työssä kokonaistilavuuden keskivirhe oli 56,6 % eli lähes sama kuin tässä tutkimuksessa. Myös tilavuusluokittain tarkasteltuna Pekkarisen (2002a) tulokset olivat tämän tutkimuksen kanssa samansuuntaisia. Anttila (2002) havaitsi keskitilavuuden estimoinnin olevan luotettavampaa suurilla kuin pienillä kuvioilla. Tämä voi johtua pienten kuvioiden rajoilla olevien pikselien, reunapikselien, suuresta suhteellisesta osuudesta verrattuna kuvion pinta-alaan. Reunapikselit voivat vaikuttaa kuvion sävyarvopiirteisiin voimakkaasti ja sitä kautta estimoinnin luotettavuuteen. Tässä työssä segmenttien keskimääräinen pinta-ala oli 0,35 ha, joten huomattava osa segmenttien pikseleistä oli tyypillisesti reunapikseleitä, mutta niiden vaikutusta estimointiin ei erikseen tutkittu.

Sävyarvojen lisäksi monissa tutkimuksissa on käytetty kuvapiirteinä erilaisia tekstuuritunnuksia (mm. Hagner 1997, Anttila 2002, Tuominen ja Pekkarinen 2005). Tuominen ja Pekkarinen (2005) havaitsivat ilmakuvalta irrotettujen koealoittaisten sävyarvojen keskiarvojen korreloivan koealan puuston tilavuuden kanssa paremmin kuin sävyarvojen hajontaa tai järjestyneisyyttä kuvaavien tekstuuritunnusten. Segmenttien homogeenisuusoletuksen vuoksi tässä tutkimuksessa päädyttiin käyttämään sävyarvojen keskiarvoja vaikkakin reunapikselien mahdollisesti aiheuttama ongelma tiedostettiin. Tämän lisäksi käytettiin sävyarvojen keskihajontoja, koska niiden käytön havaittiin laskevan kokonaistilavuuden suhteellista keskivirhettä 11–17 prosenttiyksikköä käytetystä naapurimäärästä riippuen. On myös huomattava, että tekstuuritunnusten laskenta kapeilta ja mutkikkailta segmenteilta voi tuottaa kohdesegmentille piirteitä naapurisegmenteiltä, mikä osaltaan alentaisi tekstuuritunnusten luotettavuutta. Tekstuuritunnusten vaikutusta estimoinnin luotettavuuteen kannattaa kuitenkin tarkastella jatkotutkimuksissa.

Segmenttien osittamisessa saatiin samansuuntaisia tuloksia kuin aiemminkin (esim. Pekkarinen ja Tuominen, 2003). Ositemäärän kasvaessa 20:stä 50:neen keskitilavuuden keskihajonta pieneni 5–10 m³ ha⁻¹ alueesta ja segmenttien koosta riippuen. Myös tässä tutkimuksessa keskitilavuuden keskihajonta pieneni parhaimmillaan 5 m³ ha⁻¹, kun ositemäärä lisättiin 40:stä 60:neen. Suuremmilla ositemäärillä keskihajonta olisi todennäköisesti pienentynyt edelleen, kuten kuva 3 osoittaa. Aineiston pienenä ja simu-

loinnin testaamisen vuoksi suurempaa ositemäärää ei katsottu järkeväksi käyttää. Suuremmat ositemäärät olisivat laskeneet ositekohtaista segmenttien määrä eikä simulointi olisi antanut realistista kuvaa menetelmän soveltuvuudesta käytäntöön. Segmenttien osituksen lopputulosta voitaisiin todennäköisesti parantaa käyttämällä esimerkiksi numeerista maaperäkarttaa ja segmentoimalla sekä osittamalla kivennäismaat ja suot erikseen.

Käytännön sovellustilanteen simuloinnissa havaittiin, että Neyman-kiintiöinnissä tarvittiin enemmän otoksia kuin suhteellisessa kiintiöinnissä. Tämä johtui siitä, että Neyman-kiintiöinnissä ositteissa oli edelleen suurta vaihtelua segmenttien sävyarvoissa, mitä tietoa käytettiin otoskoon määrittämisessä. Kuten edellä on todettu, aineistoon oli haettu vaihtelua todennäköisesti liikaa verrattuna aineiston määrään. Myös segmenttien koon kasvattaminen isommiksi mittauksen mahdollistamiseksi lisäsi segmenttien heterogeenisuutta. Koska sekä ositemäärällä että kiintiöintitavalla oli suuri vaikutus keskitilavuuden keskivirheeseen, tulisi näitä osa-alueita tarkastella syvällisemmin. Tarkempi analyysi vaatisi laajempaa aineistoa kuin tässä työssä oli käytettävissä

Epäsymmetrisen heijastuksen aiheuttama ilmakuvioiden sävyarvojen erilaisuus kuvan eri osissa aiheuttaa merkittävän ongelman varsinkin osituksen ja estimoinnin kannalta, jotka perustuvat siihen, että samanlaisten metsien tulisi kuvalla näyttää samantyyppisiltä. Tätä ongelmaa voidaan vähentää käyttämällä tapaukseen soveltuvaa sävyarvojen korjausmenetelmää. Segmentointi ei paikallisena operaationa ole juurikaan herkkä epäsymmetrisen heijastuksen aiheuttamille sävyarvovaihteluille, koska segmenttien koko on hyvin pieni verrattuna tämän ilmiön esiintymismittakaavaan. Segmentoinnin erityisenä ongelmana ovat sen sijaan varjosegmentit. Metsän ja avoimen alueen reunaan varjon puolelle (kuva 2) tai jopa harvan metsän sisälle saattaa muodostua varjosegmenttejä. Sävyarvoiltaan nämä tummat segmentit vastaavat vanhoja havumetsiä, mutta niiden puustotiedot voivat olla aivan muuta. Silloinkin, kun varjoalue ei muodosta omaa segmenttiä, suuren puuston aukkoon jättämä varjoalue tulee virheellisesti liitettyksi (sävyiltään samankaltaiseen) suuren puuston segmenttiin. Nämä segmentit sekoittivat todennäköisesti estimointia ja osittamista. Keinoja varjojen vaikutuksen vähentämiseksi sekä estimoin-

tiin että osittamiseen ei tässä työssä selvitetty.

Tutkimuksen perusteella segmentteihin perustuva metsävaratiedon kerääminen tarjoaa yhden vaihtoehdon metsäsuunnitteluun. Kuten johdannossa on todettu, kuvat muodostetaan metsäsuunnittelussa yleensä ajatellen tulevia toimenpiteitä. Segmentit eivät yksinään ole toimenpideyksiköiksi sopivia, mutta yhdistelemällä vierekkäisiä segmenttejä kulloisenkin tavoitteen mukaan voidaan muodostaa joustavasti sopivia toimenpideyksiköitä. Laiho (2004) teki tämän tutkimuksen osa-aineistolla tarkasteluja mitattujen segmenttien yhdistämiseksi isommiksi alueiksi. Yhdistämistä ohjasivat segmenttien pinta-ala, estimoidun puuston pituusero, pääpuulaji ja maapohjatiedot. Yhdistämisen jälkeen segmenttien muodot lähenivät metsäkeskuksen suunnittelijan tekemää kuviointia. Seuraavissa tarkasteluissa pitäisi selvittää kuinka tulevan toimenpiteen ja sen kiireellisyyden käyttäminen segmenttien yhdistämisehtoina vaikuttavat toimenpideyksiköiden muodostumiseen. Tällaisessa tarkastelussa segmenttien mittaustilavuuden toimenpidetarpeet voidaan tuottaa suoraan mitatuista tunnuksista ja tulevaisuuden toimenpidetarpeet kasvumalleilla ja simulaattorilla.

Segmentteittäin toteutettua tulkintaa voidaan ilmakuvioiden lisäksi soveltaa myös muiden kaukokartoitusaineistojen kanssa. Erityisen kiinnostavaa olisi selvittää kuinka tässä työssä kuvatun kaltainen menetelmä soveltuu yhdistetyn laserkeilaus- ja ilmakuva-aineiston tulkintaan. Esimerkiksi laserkeilausaineistoilla tehdyillä puustotunnusten estimoinneilla on saatu lupaavia tuloksia sekä puutasolla (esim. Holmgren ja Persson 2004, Yu ym. 2004) että koeala- ja kuviotasolla (esim. Næsset 1997 ja 2002, Suvanto ym. 2005). Pohjoismaista etenkin Norja, Suomi ja Ruotsi ovat olleet vahvasti mukana laseraineistoon perustuvassa tutkimustyössä (Næsset ym. 2004). Laseraineistoa käytettäessä segmentointi pohjautuisi edelleen ilmakuvioiden sävyarvoihin mutta sen lisäksi laserkeilausaineistosta saatavaa pituustietoa voitaisiin käyttää yhtenä lisäpiirteenä segmentoinnin tulosten parantamiseksi. Tämä voisi osaltaan pienentää varjojen aiheuttamaa ongelmaa segmenttien muodostamisessa sekä sitä kautta parantaa myös osittamisen luotettavuutta. Puustotunnukset voitaisiin tuottaa yhdistettyyn laser- ja ilmakuva-aineistoon perustuen, koska ilmakuva tarvitaan aputietona määrittäessä puulajia.

Kiitokset

Tämä tutkimus oli osa Metsäntutkimuslaitoksessa Maa- ja metsätalousministeriön yhteistutkimusvaroin toteutettua Metsävaratietojen tuottaminen ja ylläpito -tutkimushanketta. Kari T. Korhonen vastasi tutkimuksen eteenpäinviemisestä. Segmenttimittausten maastotyön tekivät Hannu Koivunen ja Marko Nenonen. Jaakko Heinonen avusti otannan simuloinnin suunnittelussa. Kaksi esitarkastajaa esittivät asiantuntevia ja hyödyllisiä käsikirjoitusta koskevia kommentteja. Kiitämme edellä mainittuja.

Kirjallisuus

- Anttila, P. 2002. Nonparametric estimation of stand volume using spectral and spatial features of aerial photographs and old inventory data. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 1849–1857.
- Cochran, W.G. 1977. *Sampling techniques*. John Wiley & Sons, New York. 428 s.
- GISnet MapBox v.1.1. 2002. MapLT data format description. MapSplitter user's guide. GISnet Solutions Finland, Helsinki. 10 s.
- Hagner, O. 1997. Textur i flygbilder för skattning av beståndsegenskaper. Sveriges Lantbruksuniversitet, Umeå, Arbetsrapport 29. 34 s.
- Holmgren, J. & Persson, Å. 2004. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment* 90(4): 415–423.
- Holopainen, M & Wang, G. 1998. The calibration of digitized aerial photographs for forest stratification. *International Journal of Remote Sensing* 19: 677–696.
- Hyppänen, H. 1996. Spatial autocorrelation and optimal spatial resolution of optical remote sensing data in boreal forest environment. *International Journal of Remote Sensing* 17(17): 3441–3452.
- Hyvönen, P. 2002. Kuvioittaisten puustotunnusten ja toimenpide-ehdotusten estimointi *k*-lähimmän naapurin menetelmällä Landsat TM -satelliittikuvan, vanhan inventointitiedon ja kuviotason tukiaineiston avulla. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 363–379.
- & Korhonen, K.T. 2003. Metsävaratiedon jatkuva ajantasaistus yksityismetsissä. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2003: 83–96.
- Kangas, A., Heikkinen, E. & Maltamo, M. 2002. Puustotunnusten maastoarvioinnin luotettavuus ja ajanmenekki. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 425–440.
- , Päivinen, R., Holopainen, M. & Maltamo, M. 2003. Metsän mittaus ja kartoitus. *Silva Carelica* 40. 228 s. Kansallinen metsäohjelma 2010. 1999. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja 2/1999. 38 s.
- Laasasenaho, J. & Päivinen, R. 1986. Kuvioittaisen arvioinnin tarkistamisesta. *Folia Forestalia* 664. 19 s.
- Laiho, J. 2004. Ilmakuvalta automaattisesti muodostettujen segmenttien soveltuvuus metsäsuunnittelun lähtöaineistoksi. *Metsäsuunnittelun ja -ekonomian pro gradu -työ*. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. 48 s. + liitteet.
- MacQueen, J. 1967. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. Volume 1 of *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical statistics and probability*. Berkeley, 1967. University of California Press. s. 281–297.
- Muinen, E. & Tokola, T. 1990. An application of remote sensing for communal forest inventory. *Julkaisussa: The usability of remote sensing for forest inventory and planning. Proceedings from SNS/IUFRO workshop in Umeå 26–28 February 1990*. Swedish University of Agricultural Sciences, Remote Sensing Laboratory, Report 4: 35–42.
- , Maltamo, M., Hyppänen, H. & Vainikainen, V. 2001. Forest stand characteristics estimation using a most similar neighbor approach and image spatial structure information. *Remote Sensing of Environment* 78(3): 223–228.
- Mäkelä, H. & Pekkarinen, A. 2001. Estimation of timber volume at the sample plot level by means of image segmentation and Landsat TM imagery. *Remote sensing of Environment* 77(1): 66–75.
- Narendra, P. & Goldberg, M. 1980. Image segmentation with directed trees. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Pami-2: 185–191.
- Næsset, E. 1997. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 61(2): 246–253.
- 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote sensing of Environment* 80(1): 88–99.
- , Gobakken, T., Holmgren, J., Hyypä, H., Hyypä, J., Maltamo, M., Nilsson, M., Olsson, H., Persson, Å. & Söderman, U. 2004. Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. *Scandinavian Journal of*

- Forest Research 19: 482–499.
- Pekkarinen, A. 2002a. Image segment-based spectral features in the estimation of timber volume. *Remote Sensing of Environment* 82(2–3): 349–359.
- 2002b. A method for the segmentation of very high spatial resolution images of forested landscapes. *International Journal of Remote Sensing* 23(14): 2817–2836.
- & Tuominen, S. 2003. Stratification of a forest area for multisource forest inventory by means of aerial photographs and image segmentation. Julkaisussa: Corona, P., Köhl, M. & Marchetti, M. (toim.). *Advances in forest inventory for sustainable forest management and biodiversity monitoring*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands. s. 111–123.
- Poso, S. 1983. Kuvioittaisen arvioimismenetelmän perusteita. *Silva Fennica* 17(4): 313–349.
- & Kujala, M. 1971. Ryhmitetty ilmakuva- ja maastototanta Inarin, Utsjoen ja Enontekiön metsien inventoinnissa. *Folia Forestalia* 132. 40 s.
- Redsven, V., Anola-Pukkila, A., Haara, A., Hirvelä, H., Härkönen, K., Kärkkäinen, L., Lempinen, R., Muinonen, E., Nuutinen, T., Salminen, O. & Siitonen, M. 2002. MELA2002 reference manual. *Metsäntutkimuslaitos*. 590 s.
- Rosenfield, G.H. & Fitzpatrick-Lins, K. 1986. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 52(2): 223–227.
- Solmu. Metsäsuunnittelun maastotyöopas. 2000. *Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio*, Helsinki. 82 s.
- Suvanto, A., Maltamo, M., Packalén, P. & Kangas, J. 2005. Kuviokohtaisten puustotunusten ennustaminen laserkeilauksella. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2005: 413–428.
- Tokola, T., Pitkänen, J., Partinen, S. & Muinonen, E. 1996. Point accuracy of a non-parametric method in estimation of forest characteristics with different satellite materials. *International Journal of Remote Sensing* 17(12): 2333–2351.
- Tomppo, E. 1990. Satellite image based national forest inventory of Finland. *Photogrammetric Journal of Finland* 12(1): 115–120.
- Torttila, J. 2003. *ForestPad käyttöopas v. 1.2*. GISnet Solutions Finland. 21 s.
- Tuominen, S. & Pekkarinen, A. 2004. Local radiometric correction of digital aerial photographs for multi source forest inventory. *Remote Sensing of Environment* 89(1): 72–82.
- & Pekkarinen, A. 2005. Performance of different spectral and textural aerial photograph features in multi-source forest inventory. *Remote Sensing of Environment* 94(2): 256–268.
- , Holopainen, M. & Poso, S. 2006. Multiphase sampling. Julkaisussa: Kangas, A. & Maltamo, M. (toim.). *Forest Inventory – methodology and applications*. Springer, Netherlands. s. 235–252.
- Utterä, J., Hiltunen, J., Rissanen, P., Anttila, P. & Hyvönen, P. 2002. Uudet kuvioittaisen arvioinnin menetelmät – arvio soveltuvuudesta yksityismaiden metsäsuunnitteluun. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 523–531.
- Yu, X., Hyyppä, J., Kaartinen, H. & Maltamo, M. 2004. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 90(4): 451–462.

39 viitettä