

Jaana Luoranen, Risto Rikala, Kyösti Konttinen ja Heikki Smolander

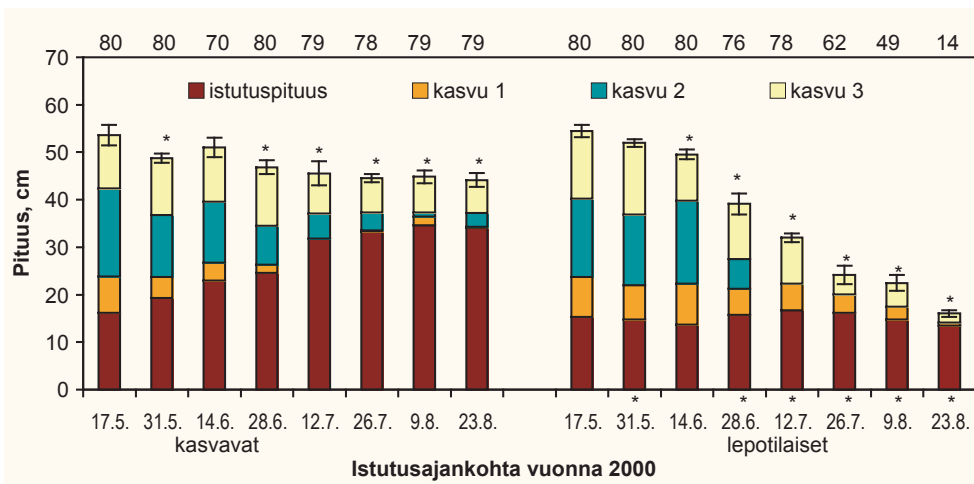
## Kuusen istutuskauden jatka- minen lepotilaisilla ja kasva- villa paakkutaimilla

Seloste artikkelista: Luoranen, J., Rikala, R., Konttinen, K. & Smolander, H. 2005. Extending the planting period of dormant and growing Norway spruce container seedlings to early summer. *Silva Fennica* 39(4): 481–496.

**K**oneellisen istutuksen yleistessä istutuskautta on tarve jatkaa perinteistä kevään istutuskautta pitemmäksi. Istutuskautta jatkettaessa on mahdol-

lista käyttää joko kevätistutukseen tarkoitettuja, ulkona talven varastoituja jo kasvussa olevia taimia tai pakkasvarastoituja lepotilaisia taimia. Ulkona varastoidut taimet kasvavat taimitarhalla istutukseen saakka, jolloin ne voivat kasvaa liian suuriksi suhteessa paakun kokoon ja kasvatustheyteen. Lepotilaisina istutettavilla taimilla puolestaan istutuksen ja ensimmäisten syyshaljojen välinen aika pitäisi olla riittävän pitkä niin, että uusi vuosikasvain ehtisi kasvaa, muodostaa päätesilmut ja karaistua.

Tutkimuksessa selvitettiin istutuskauden laajentamismahdollisuuksia alkukesään istuttamalla kasvavia kuusen paakkutaimia neljään maastokokeeseen toukokuun puolivälistä heinäkuun puoliväliin tai kasvavia ja lepotilaisia taimia kahteen maastokokeeseen toukokuun puolivälistä elokuun loppuun. Taimien kehitystä seurattiin mittaamalla taimien pituus ja arvioimalla taimien kunto ja mahdolliset



Kasvavina (vasemmat pylväät) ja lepotilaisina (oikealla) taimitarhapellolle istutettujen kuusen paakkutaimien pituuskehitys. Kasvatat taimet oli varastoitu talven ulkona kasvatusarkeissaan ja lepotilaiset taimet pahvilaatikoissa pakkasvarastossa. Numerot yläreunassa kertovat elävien taimien määrän (taimia istutettiin 80 kpl/kerta) viimeisellä mittauskerralla eri istutusajankohtina. Eri istutusajankohtina (31.5.–22.8.) istutettujen taimien kokonaispituuden poikkeama ( $p < 0,05$ ) vertailu istutusajankohdasta (17.5.) on merkitty ao. ajankohdan pylvään päälle tähdellä (\*). Lepotilaisena istutettujen taimien poikkeamista vastaavan ajankohdan kasvavina istutetuista taimista on merkitty pylvään alapuolella tähdellä (\*).

tuhonaiheuttajat vuosittain. Taimien juurtumista eri istutusajankohtina selvitettiin istuttamalla taimia ruukkuihin kasvihuoneessa ja määrittämällä kolmen viikon kasvatuksen jälkeen paakusta uloskasvaneiden juurien kuivamassa. Koska varastointiaika pakkasvarastossa muodostui normaalia pitemmäksi, määritettiin lepotilaisten taimien hiilihydraattipitoisuus neulasnäytteistä istutushetkellä.

Kasvussa olevina istutettujen taimien elävyys ei eronnut eri istutusajankohtina toukokuun puolivälistä heinäkuun puoliväliin. Sen sijaan lepotilaisina istutettujen taimien elävyys heikkeni mitä myöhemmin kesällä ne istutettiin. Pakkasvarastoinnin pidentäminen ei kuitenkaan vähentänyt neulasten hiilihydraattivarastoja tai juurten kasvua. Ensimmäisinä istutuskertoina kevätistutukseen tuotetut taimet olivat sopivan kokoisia, mutta jo kesäkuun puolivälin jälkeen ne olivat kasvaneet liian kookkaiksi paakun tilavuuteen nähden, minkä seurauksena taimien kasvu heikkeni istutuksen jälkeen. Juurtuminen oli nopeinta heinäkuussa ja elokuun alussa ja hitainta toukokuussa ja syyskuussa.

Tulosten mukaan lepotilaisia taimia voidaan istuttaa toukokuusta kesäkuun puoleen väliin ilman, että taimien kasvu heikkenee tai kuolleisuus lisääntyy. Talvella ulkona varastoitujen ja kesäkuussa jo kasvussa olevien, kevätistutukseen tarkoitettujen taimien istutuskautta voidaan pidentää vielä pidemmäksi. Kasvussa olevat taimet voivat kuitenkin kärsiä ja niiden kasvu heiketä johtuen uuden vuosikasvaimen vaurioherkkyydestä ja taimien liian suuresta pituudesta. Tulokset perustuvat huolellisesti perustettuihin kokeisiin. Jatkossa olisikin selvítettävä, liittyykö istutuskauden pidentämiseen riskejä käytännön metsänuudistamisessa sekä edelleen, olisiko istutuskautta mahdollista pidentää kesäkuun puolivälin jälkeen erityisesti kesäistutukseen tarkoitetuilla taimilla.

■ MMT Jaana Luoranen, MMT Risto Rikala, mi Kyösti Konttinen, MMT Heikki Smolander, Metsäntutkimuslaitos, Suonenjoki. Sähköposti: jaana.luoranen@metla.fi, risto.rikala@metla.fi, kyosti.konttinen@metla.fi, heikki.smolander@metla.fi

Hannu Salminen ja Risto Jalkanen

## Pohjoissuomalaisen männyn pituuskasvun ja lämpötilan välisen yhteyden mallittaminen

Seloste artikkelista: Salminen, H. & Jalkanen R. 2005. Modelling the effect of temperature on height increment of Scots pine at high latitudes. *Silva Fennica* 39(4): 497–508

Tutkimuksessa tarkastellaan männyn pituuskasvun ja kuukausitason säätunnusten välistä yhteyttä viidessä lappilaisessa metsikössä. Metsiköt sijaitsevat Napapiiriltä männyn vakiintuneen metsänrajan pohjoispuolelle seuraavilla paikkakunnilla: Rovaniemen Vanttauskoski, Sodankylä, Laanila, Kaamanen ja Kevo. Pituuskasvut mitattiin 49 kaatokoepuusta ja tarkistettiin eri korkeuksilta vuosilustojen avulla. Mahdollisten rangenvaihtojen esiintyminen selvitettiin puun ytimestä. Puun iästä riippuen pituuskasvuaikeasarjat alkoivat joko 1950- tai 1960-luvuilta ja päättyivät mittausvuoteen 1996.

Pituuskasvuja verrattiin kuukauden keskilämpötiloihin ja sadantoihin. Iän vaikutuksen poistamisen jälkeen aikasarjojen korrelaatioanalyysin avulla poimittiin muuttujat pituuskasvua selittävään monitasomalliin, joka ottaa huomioon aineiston hierarkkisen rakenteen.

Tärkein vuotuisen pituuskasvun vaihtelua ohjaava muuttuja oli edellisen vuoden heinäkuun lämpötila (korrelaatiokerroin  $r > 0,7$ ); mitä lämpimämpi heinäkuu, sitä parempi on seuraavan vuoden pituuskasvu. Riippuvuus oli voimakkainta kolmessa pohjoisimmassa metsikössä eli metsänrajaympäristössä. Männyn pituuskasvu on ns. ennalta määrättyä, eli pituuskasvuaiheet muodostuvat latvasilmuun kasvua edeltävänä kesänä pääosin juuri heinäkuussa. Sääolot latvasilmun muodostumisen aikaan ovat siten keskeisiä pituuskasvun vaihtelun ohjaajia. Kahden vuoden takaisen marraskuun lämpötilan ja pituuskasvun välillä oli negatiivinen riippuvuus, joka oli

tilastollisesti merkitsevä kolmessa pohjoisimmassa metsikössä; lämmin marraskuu vähentää seuraavana kesänä syntyvien pituuskasvuaiheiden määrää ja edelleen sitä seuraavan kesän pituuskasvua. Kasvuvuoden kevään ja alkukesän lämpötiloilla ja pituuskasvulla oli tilastollinen riippuvuus ainoastaan Laanilan metsikössä, jonka kasvu oli muutenkin herkempää säiden vaihtelulle. Sadanta ei vaikuttanut pituuskasvuun lainkaan.

Lopullisen pituuskasvun monitasomallin selittäjiksi valikoituivat puun ikä, metsikön lämpösumman pitkäaikaiskeskiarvo ja edellisen vuoden heinäkuun keskilämpötila. Mallin tulkinnan mukaan yhden asteen muutos heinäkuun lämpötilassa johtaa keskimäärin 1,8 cm:n muutokseen seuraavan vuoden pituuskasvussa. Malli pystyi kuvaamaan 74 % mitatusta pituuskasvun vaihtelusta. Pituuskasvu on merkittävä lisä dendroklimatologiisiin tutkimuksiin vuosilustosarjojen ohella; sen avulla voidaan laatia heinäkuun lämpötilojen kuvaus historiallisista aineistoista.

■ MMM Hannu Salminen, MMT Risto Jalkanen, Metsäntutkimuslaitos, Rovaniemi.  
Sähköposti hannu.salminen@metla.fi,  
risto.jalkanen@metla.fi

Sanna Laukkanen, Teijo Palander,  
Jyrki Kangas ja Annika Kangas

## Monikriteerisen äänestysmenetelmän soveltaminen puunkorjuun ryhmäpäättö- tukeen

Seloste artikkelista: Laukkanen, S., Palander, T., Kangas, J. & Kangas, A. 2005. Evaluation of the multicriteria approval method for timber-harvesting group decision support. *Silva Fennica* 39(2): 249–264.

**L**uonnonvarojen suunnittelussa on jo pitkään sovellettu monia erilaisia monitavoitteisen päättösten menetelmiä. Puunkorjuun suunnittelun puolella käytetyt menetelmät ovat kuitenkin tähän asti perustuneet lähinnä lineaariseen ohjelmointiin ja tai siitä johdettuihin menetelmiin, joissa ainoana tavoitteena on tuottojen maksimointi tai kustannusten minimointi. Koska tänä päivänä myös puunkorjuun suunnittelutilanteissa metsien käytölle kohdistuu niin taloudellisia, ekologisia kuin sosiaalisiaakin tavoitteita, tulisi kestävän kehityksen turvaamiseksi myös puunkorjuun päätöksentekoprosessien tukemiseen käyttää menetelmiä, jotka mahdollistavat näiden tavoitteiden huomioinnin ottamisen.

Perikuntien ja yhtymien ollessa kasvavia metsänomistajaryhmiä, on päätöksentekotilanteissa yhä useammin läsnä useita ihmisiä tai ihmisryhmiä. Tämän takia puunkorjuun suunnittelussa käytettävien monitavoitteisten päätöstukimenetelmien tulisi soveltua ryhmäpäättöstilanteissa käytettäväksi. Yksi lähestymistapa ryhmäpäättötukeen on äänestysteorian soveltaminen. Äänestysteoria tarjoaa lukuisia erilaisia menetelmiä, joiden soveltamismahdollisuudet metsätalouden ryhmäpäättöstuessa vaikuttavat lupaavilta. Luonnonvarojen suunnittelussa äänestysmenetelmiä on käytetty aiemmin useissa eri tutkimuksissa.

Tutkimuksessa äänestysteoriaan pohjautuvista menetelmistä valittiin käytettäväksi monikriteerinen äänestysmenetelmä – MA-menetelmä (multicriteria approval). MA-menetelmä on kehitetty hyväk-

symisäänestyksestä ja sen alkuperäinen versio on tarkoitettu yhden päätöksentekijän monitavoitteiseen päätöksentekoon. Menetelmä ja sen laskelmat perustuvat kriteerien tärkeysjärjestyksen muodostamiseen, hyväksymisrajan määrittämiseen kullekin kriteerille sekä vaihtoehtojen hyväksyttävyyksien määrittämiseen kunkin kriteerin suhteen.

Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää alkuperäistä MA-menetelmää puunkorjuun ryhmäpääöstukeen soveltuvaksi. Menetelmästä kehitettiin kaksi uutta ryhmäpääöstukiversiota. Toinen kehitetyistä versioista oli vain kevyesti modifioitu alkuperäisestä MA-menetelmästä. Tässä versiossa käytettiin metsänomistajien yhteistä MA-analyysiä. Borda count -äänestystä sekä kumulatiivista äänestystä käytettiin menetelmän sisällä päätöksentekijöiden yhteisen kriteerien tärkeysjärjestyksen muodostamiseen. Toinen versioista oli pidemmälle kehityä ja perustui metsänomistajille muodostettuihin erillisiin MA-analyysihin. Menetelmässä yhdisteltiin hyväksymisäänestyksen ja Borda count -äänestyksen periaatteita.

Tapaustutkimuksessa MA-menetelmää sovellettiin kolmen omistajan yhtymämetsätilan ryhmäpääöstekotilanteessa puunkorjuuvaihtoehdon valintaan. Aiemmin taktisen tason suunnittelussa määritellylle alueelle muodostettiin 30 erilaista operatiivisen tason puunkorjuuvaihtoehtoa, jotka olivat hakkuutavan, korjuuteknologian ja korjuuajankohdan yhdistelmiä. Metsänomistajat esittivät viisi eri kriteeriä, jotka kuvasivat heidän tavoitteitaan metsän käytön suhteen; luonnonsuojeluarvot, odotetut korjuuvauriot, nettotulot, paikallisyrittäjyyden suosiminen ja vaikutukset virkistysarvoihin. Osa kriteereistä oli kvantitatiivisia ja osa kvalitatiivisia. MA-menetelmän avulla vertailtiin puunkorjuuvaihtoehtoja kriteerien suhteen ja valittiin toteutettava puunkorjuuvaihtoehto.

Tutkimuksessa testattiin menetelmäversioiden käyttökelpoisuutta, helppoutta, kyselyiden ymmärrettävyyttä sekä tulosten yhdenmukaisuutta eri laskentatavoissa. Versioiden tuottamia tuloksia vertailtiin keskenään, mutta päähuomio oli kuitenkin versioiden käytännön soveltuvuudessa metsätalouden ja erityisesti puunkorjuun suunnittelun ryhmäpääöstuen kannalta.

Äänestykseen perustuvat menetelmät vaikuttavat soveltuvan hyvin puunkorjuun ryhmäpääöstukeen. Tässä tutkimuksessa käytetty MA-menetelmä ja sen eri versiot osoittautuivat helposti ymmärrettäviksi ja yksinkertaisiksi soveltaa käytännössä. Nämä ominaisuudet mahdollistavat internetin hyödyntämisen menetelmän vaatimien kyselyiden toteuttamisessa. MA-menetelmää käytettäessä pystytään myös ottamaan huomioon sellaisia tavoitteita, joita ei ole pystytty ottamaan huomioon perinteisissä puunkorjuun suunnittelun menetelmissä. Muihin monitavoitteisen päätöstuen menetelmiin verrattuna äänestysmenetelmien käyttö tuo apua sellaisiin metsätalouden käytännön päätöksentekotilanteissa kohdattuihin ongelmiin kuten mahdollinen informaation huonolaatuisuus koskien päätöksentekijöiden preferenssejä sekä päätösvaihtoehtojen arvottamista kriteerien suhteen. MA-menetelmä on parhaimmillaan tilanteissa, joissa muiden menetelmien vaatimaa tarkkaa informaatiota ei ole saatavilla tai sen hankkiminen on kallista ja aikaa vievää. Esimerkiksi ekologisten ja virkistysellisten arvojen suhteen suhteellista tietoa ei ole aina saatavilla. MA-menetelmässä riittää järjestysasteikollinen tieto sekä päätöksentekijän preferensseistä että päätösvaihtoehtojen arvottamisesta kriteerien suhteen. MA-menetelmää käytettäessä päätöksentekoprosessi on tasapuolinen kaikille osallistujille, koska prosessi on läpinäkyvä ja tulokset ovat helposti tulkittavissa.

■ MMM Sanna Laukkanen, MMT Teijo Palander, Joensuun yliopisto; MMT Jyrki Kangas, UPM Kymmene Metsä; Prof. Annika Kangas, Helsingin yliopisto, metsävarojen käytön laitos. Sähköposti: sanna.laukkanen@joensuu.fi, teijo.palander@joensuu.fi, annika.kangas@helsinki.fi, jyrki.kangas@upm-kymmene.com,

Eero Muinonen

## Rasterikartan tuottaminen kuljetusoptimoinnilla satelliittikuvapohjaisessa metsän inventoinnissa

Seloste artikkelista: Muinonen, E. 2005. Generating a raster map presentation of a forest resource by solving a transportation problem. *Silva Fennica* 39(4): 585–598.

**S**atelliittikuvapohjaisia metsäninventointimenetelmiä tarvitaan erityisesti suuraluekohtaisia metsätalouden suunnittelulaskelmia varten. Näistä menetelmistä on toivottu saatavan tukea tilanteessa, jossa pelkkään koealaotantaan perustuvat laskelmat eivät tarjoa riittävän luotettavaa lähtötietoa suunnittelulaskelmille. Satelliittikuvaa käytetään kaukokartoituspohjaisissa menetelmissä aputietona maastokoealatietojen yleistämisessä inventoitavalle alueelle. Olettaen, että samankaltaista metsää esiintyy myös inventoitavan alueen ulkopuolella, maastokoealatietoa on näissä menetelmissä käytetty myös laajemmalla alueella tämän alueen ympäriltä.

Tutkimuksessa paneudutaan tilanteeseen, jossa kaukokartoituspohjainen inventointimenetelmä on tuottanut maastokoealoille ns. pinta-alapainot. Nämä painot ovat ei-negatiivisia ja siten tulkittavissa pinta-alaksi, jota kyseinen koeala edustaa inventoitavalla alueella. Ne siis ilmaisevat koealan kanssa samanlaisen alueen pinta-alan inventoitavalla alueella. Tutkimuksessa on lisäksi kyseessä tilanne, jossa käytetty laskentamenetelmä ei suoraan anna mahdollisuutta puustotunnuksen estimaatin rasterikarttamuotoiseen esitykseen. Kyseisessä tilanteessa ollaan, mikäli inventoinnissa sovelletaan erästä aiemmin esitettyä menetelmää, kalibrintiestimointia. Rasterikartan tuottamisessa on kyse inventoitavan alueen kunkin pikselin pinta-alapainon allokoinnista maastokoealoille. Tämä on esitetty kuljetusongelmana, jossa kunkin pikselin pinta-alapaino on kuljetettava kohteeseensa koealalle, kun kunkin koealan saaman painon summa on rajoitettu. Kuljetusongelmassa minimoitavana kustannuksena on

sävyetäisyys, joka on laskettavissa kullekin pikseli-koealapikseli -parille satelliittikuvan sävyarvojen perusteella. Kuljetusongelma on lineaarisen optimoinnin erikoistapaus, jonka ratkaisemiseen käytettiin olemassa olevaa algoritmia.

Tutkimuksessa oli tavoitteena tuottaa rasterikartta em. menetelmällä osana kalibrintiestimointipohjaista inventointisysteemiä. Lisäksi tuotettiin rasterikartat perustuen osin tai kokonaan ei-parametrisen lähimmän naapurin menetelmän sovellukseen, sekä heuristiseen menetelmään. Rasterikartat tuotettiin puuston tilavuudelle ja pikselikohtaista tarkkuutta tutkittiin satunnaisesti valittujen testikoealojen avulla. Tutkimusalue oli Etelä-Savosta ja satelliittikuva-tietona oli Landsat 7 ETM -satelliittikuva; maastoaineisto koostui VMI9:n koealatiedoista.

Tutkimuksen kahdella testialueella, kumpikin pinta-alaltaan 150 km<sup>2</sup>, kuljetusongelmaksi muotoillun tehtävän ratkaiseminen onnistui. Rasterikartan tuottamisessa jälkitoimenpiteenä osoittautui tarpeelliseksi keskiarvosuodatus, joka alensi pikselikohtaista virhettä tuloksissa. Inventoitavan alueen pinta-alan kasvaessa kasvaa myös kuljetusongelman koko. Rasterikartan tuottaminen esitetyssä muodossaan kuljetusongelman kautta ei ole otettavissa käyttöön suuremmilla alueilla ilman laskennan tehokkuuden parantamista. Lähimmän naapurin menetelmää käytettäessä inventoitavan alueen pinta-alan kasvattaminen ei tuo samantyyppisiä vaikeuksia, joten se puolustaa paikkaansa suoraviivaisena ja joustavana laskentamenetelmänä kaukokartoituspohjaisessa metsän inventoinnissa.

■ MML Eero Muinonen, Metsäntutkimuslaitos, Joensuu.  
Sähköposti: eero.muinonen@metla.fi

Sakari Tuominen ja Markus Haakana

## Landsat ETM -satelliittikuvat ja korkeailmakuvat metsätunnusten estimoinnissa

Seloste artikkelista: Tuominen, S. & Haakana, M. 2005. Landsat TM imagery and high altitude aerial photographs in estimation of forest characteristics. *Silva Fennica* 39(4): 573–584.

Satelliittikuvia on laajalti käytetty metsävarojen estimoinnissa, esim. Suomessa valtakunnan metsien 8. inventoinnista lähtien. Käytetty menetelmä yhdistelee tietoa maastomittauksista, satelliittikuvista ja numeerisista kartoista. Mustavalkoilmakuvia on aikaisemmin hyödynnetty visuaalisessa kuvantulkinnassa esim. valtakunnan metsien 5. inventoinnissa Pohjois-Suomessa, ja menetelmää sovellettiin vielä 6. ja 7. VMI:ssä, mutta nykyisin visuaalisen ilmakuvantulkinnan käyttö metsätaloudessa rajoittuu lähinnä metsäsuunnittelun kuvioittaisen arvioinnin kuvioiden rajaukseen. Mustavalkoisen korkeakuvaa-aineiston saatavuus ja ajantasaisuus Suomessa on kuitenkin hyvä ja aineisto tarjoaa potentiaalisen tietolähteen metsäninventointia ajatellen.

Verrattaessa korkeailmakuvien ja satelliittikuvien heikkouksia ja vahvuuksia satelliittikuvan pääetuna on yleensä hyvä spektrinen erotuskyky ja laaja spektrialue. Korkeailmakuvan etuna taas on satelliittikuvaa parempi spatiaalinen erotuskyky. Toisaalta spektrinen alue on kapea ja ilmakuvaan vaikuttavat haitallisesti satelliittikuvaa enemmän sävyarvojen vaihtelut (kuten bidirektionaalinen heijastus), jotka aiheutuvat auringon, sensorin ja tarkasteltavan kohteen vaihtelevasta geometriasta kuvalla. Tällaiset ilmiöt ovat tyypillisiä kaukokuville, joissa kuvauksen avauskulma on suuri ja kuvauksen korkeus suhteellisen matala kuten tyypillisesti on perinteisillä filmikameroin perustuvilla ilmakuvauksilla.

Ilmakuvien korkea spatiaalinen resoluutio tekee mahdolliseksi hyödyntää kuvantulkinnassa tekstuuria, joka voidaan määrittellä kuvan (harmaa-) sävyjen spatiaalisena järjestyneisyytenä. Tekstuurin hyödyntäminen yleensä edellyttää, että käytettävän kuvan

spatiaalisen resoluution tulee olla oikeassa mittakaavassa tarkasteltavaan kohteeseen. Mikäli kuvan resoluutio on liian karkea, pikselikoko ei vastaa tarkasteltavan kohteen vaihtelua (esim. puiden latvukset), ja pikselien paikallinen varianssi on matala, jolloin tekstuuri ei tuo lisäinformaatiota. Tästä syystä esim. Landsat-satelliittikuvien tekstuurin käyttö metsätunnusten estimoinnissa on yleensä tuottanut heikkoja tuloksia. Satelliittikuvien sävyarvopiirteiden ja ilmakuvan tekstuuripiirteiden yhdistäminen tekee mahdolliseksi hyödyntää kummankin kuva-aineiston vahvuuksia metsäninventoinnissa.

Tutkimusalue sijaitsee Häme-Uudenmaan metsäkeskuksessa Lahden ympäristössä. Alueen koko on noin 281 000 ha, josta metsätalousmaata 172 000 ha. Tutkimuksessa käytetty Landsat 7 ETM -satelliittikuva oli vuodelta 2000. Oikaistun kuvan resoluutio oli 25 m. Satelliittikuvapiirteinä tutkimuksessa käytettiin kanavien 1–5 ja 7 sävyarvoja. Käytetyt korkeailmakuvat olivat vuodelta 1999. Kuvauksen mittakaava oli 1:60 000, ja kuvat oli orto-oikaistu 1 m resoluutioon.

Metsätunnusten estimointia varten korkeailmakuvasta muodostettiin 4-kanavainen kuva, jossa oli 1 sävyarvokanava ja 3 tekstuurikanavaa. Muodostetut kanavat muunnettiin satelliittikuvan resoluutioon. Metsätalousmaan erottamiseen muista maankäyttöluokista käytettiin numeerista karttatietoa. Koealatiedot olivat peräisin valtakunnan metsien 9. inventoinnista vuosilta 1998–1999 sekä maastossa tätä tutkimusta varten tehdyistä lisämittauksista. Koealat, joilla maastomittauksen ja kuvausajankohdan välillä oli tehty päätehakkuita, poistettiin aineistosta. Lisäksi tarkastelusta jätettiin pois koealat, jotka sijaitsivat kuviorajalla.

Tutkimusalueen maastokoealojen kokonaismäärä oli satelliittikuvalla 691 (341 metsätalousmaalla) ja korkeailmakuvamosaaiikilla 698 (346 metsätalousmaalla). Koealamäärien ero eri kuva-aineistoilla johtuu päätehakkuita ja satelliittikuvan pilvistä.

Metsätunnusten estimointiin käytettiin k:n lähimmän naapurin luokitusmenetelmää (k-*nn*). Menetelmässä kullekin estimoitavalle pisteelle haetaan k lähintä (ts. kuvapiirteiltään lähinnä samanlaista) maastokoealaa kuvapiirteiden muodostamassa piirreavaruudessa, jossa ulottuvuuksien määrä on yhtä kuin kaukokuvilta irrotettujen kuvapiirteiden määrä. Etäisyys piirreavaruudessa määritettiin havaintojen

välisenä euklidisena etäisyytenä. Lähimpiä naapureita painotettiin estimoinnissa euklidisen etäisyyden neliön käänteisluvulla. Luokitusparametrien valinta testattiin ristiinvalidointi-tekniikalla (cross-validation), missä kukin koeala vuorollaan jätettiin tukiaineistosta pois ja ennustettiin jäljelle jäävien koealojen avulla. Estimointituloksia verrattiin maastokoealojen mittaustietoihin tarkastelemalla keskivirhettä ja harhaa. Tulosten perusteella  $k:n$  arvoksi asetettiin 5 ja koealojen maksimaaliseksi maantieteelliseksi hakusäteeksi valittiin 40 km. Muiden luokitusparametrien vaikutus keskivirheeseen ja harhaan ei ollut merkittävä.

Käytettäessä satelliitti- ja ilmakuvapiirteitä erikseen metsikkötunnusten estimoinnissa satelliittikuva tuotti kaikkien testattujen tunnusten osalta tarkemmat estimaatit kuin ilmakekuva. Tämän perusteella voidaan päätellä, että satelliittikuvan laaja spektrinen alue palvelee metsäinventointitarkoitusta paremmin kuin mustavalkoilmakekuvan korkeampi spatiaalinen resoluutio ja kapea spektrinen peittoalue. Toisaalta korkeailmakekuvapiirteiden avulla tuotettujen metsätunnusestimaattien tarkkuuden ero satelliittikuvalla tuotettuihin verrattuna ei ollut merkittävän suuri (paitsi puulajien erottamisen osalta), varsinkin ottaen huomioon, että kaikki käytetyt kuvapiirteet oli johdettu yhden pankromaattisen kuvakanavan perusteella. Tämän perusteella voidaan olettaa, että korkearesoluutioisen kuvan tekstuuripiirteissä on merkittävää informaatiota metsäinventoinnin kannalta.

Käytettäessä satelliitti- ja ilmakuvapiirteiden yhdistelmää estimoinnissa estimaattien tarkkuuteen saatiin jonkin verran parannusta useimpien tunnusten kohdalla, sen sijaan männyn ja koivun tilavuuksien sekä latvuspeiton kohdalla Landsat-satelliittikuvan piirteillä yksinään päästiin tarkimpiin estimaatteihin.

Tässä tutkimuksessa käytetty menetelmä satelliitti- ja ilmakuvapiirteiden yhdistämiseen ei ole välttämättä paras tapa. Erityyppisten kuvapiirteiden yhdistäminen samaan piirreavaruuteen saattaa johtaa siihen, että  $k:n$  lähimmän naapurin estimointimenetelmää sovellettaessa esim. sävypiirteiden samankaltaisuus saattaa peittää merkittävän tekstuuripiirteiden eron, ja lähimmiksi naapureiksi tulee valituksi metsänrakenteeltaan estimoitavasta pisteestä poikkeavia koealoja.

$K-nn$ -menetelmässä erilaisten kuvapiirteiden vaihtuksen hallinta on vaikeaa, koska kuvapiirteiden ja metsätunnusten välillä ei ole lineaarista suhdetta, varsinkaan tekstuuripiirteiden osalta. Käytettäessä hierarkkisempaa yhdistämistapaa voitaisiin varmistaa, että kummankin piirretyypin vaikutus tulee huomioitua haettaessa piirreavaruudessa lähimpiä naapureita. Korkeailmakekuvan käytössä edelleen on huomattava, että aineiston hinta suhteessa pinta-alaan on huomattavasti satelliittikuvaa korkeampi. Näin ollen ilmakekuvia voitaisiin käyttää esim. peittämään satelliittikuvissa olevia pilvien aiheuttamia aukkoja.

■ MMM Sakari Tuominen, MMM Markus Haakana, Metsäntutkimuslaitos, Helsinki. Sähköposti: sakari.tuominen@metla.fi, markus.haakana@metla.fi

Petteri Muukkonen ja Raisa Mäkipää

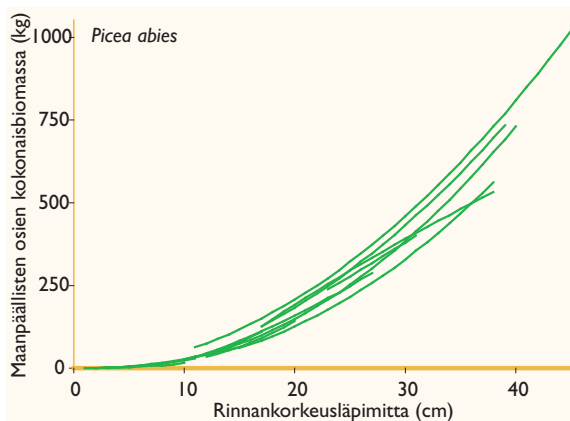
## Eurooppalaisten puulajien tilavuus- ja biomassayhtälöiden kirjo on suuri

Seloste artikkelista: Zianis, D., Muukkonen, P., Mäkipää, R. & Mencuccini, M. 2005. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica Monographs* 4. 63 s.

**P**uuston runkotilavuuden ja biomassan määrittäminen on tarpeellista muun muassa metsävaroja kartoitettaessa sekä ekosysteemien energia- ja ravinnevirtoja tutkittaessa. Myös Ilmastopimuksen edellyttämän metsien hiilitaseiden laskennan työkaluiksi tarvitaan puuston biomassan arviointimenetelmiä. Puutason tilavuus- ja biomassayhtälöitä voidaan soveltaa sellaisenaan puutason inventaariotietoon tai niitä voidaan käyttää metsikkötason biomassaaestimointien kehittämiseen ja testaamiseen.

Tässä tutkimuksessa koottiin Euroopassa kasvavien puulajien puutason tilavuus- ja biomassayhtälöitä, joissa käytetään selittävänä muuttujana rinnankorkeusläpimittaa ja/tai puun korkeutta. Vastaavia yhteenvedoja on tehty aiemmin Pohjois-Amerikasta (Tritton ja Hornbeck 1982, Ter-Mikaelian ja Korzukhin 1997, Jenkins ym. 2004) ja Australiasta (Eamus ym. 2000, Keith ym. 2000). Tässä tutkimukseen koottiin ainoastaan yhtälöitä, joissa selittävänä tekijänä oli rinnankorkeusläpimitta, puun pituus tai niiden erilaiset yhdistelmät. Näiden lisäksi on olemassa runsaasti erilaisia paikallisiin olosuhteisiin sovitettuja yhtälöitä, joiden selittävinä tekijöinä voi olla edellisten lisäksi myös muun muassa kasvupaikkatyyppi, korkeus merenpinnasta, maalaji tai yksittäisen puun muita mittauksia.

Tässä työssä on esitetty biomassayhtälöitä 39 eri puulajille yhteensä 607 kappaletta, joista suurin osa on tarkoitettu maanpäällisten puun osien (esimerkkinä kuva 1) ja erityisesti oksien ja lehtien biomassojen ennustamiseen. Kuolleita oksia, käpyjä ja juuristoa varten kehitettyjä biomassayhtälöitä löytyi vain muutamia kappaleita. Suurin osa biomassayhtälöistä on kehitetty Pohjois- ja Keski-Euroopassa;



Kuva 1. Eri yhtälöiden mukaisia ennusteita kuusen maanpäällisten osien kokonaisbiomassalle (kg) suhteessa rinnankorkeusläpimittaan (cm).

vain 82 yhtälöä on peräisin Etelä-Euroopasta. Suurin osa biomassayhtälöistä pohjautui aineistoihin, jotka käsittivät vain muutamia koepuita yhdestä metsiköstä. Ainoastaan Marklundin (1987, 1988) yhtälöt perustuvat koko maan (Ruotsin) kattavaan aineistoon.

Runkotilavuuden ennustamiseen soveltuvia yhtälöitä yhteenvedossamme on yhteensä 230 kappaletta 55 eri puulajille. Yhteenvedo osoittaa, että havupuille on kehitetty tilavuusyhtälöitä huomattavasti enemmän kuin lehtipuille. Biomassayhtälöihin verrattuna tilavuusyhtälöt perustuvat useimmiten suurempaan määrään kaadettuja koepuita. Lähes kaikissa tilavuusyhtälöissä rinnankorkeusläpimitta ja puun pituus olivat yhdessä selittävinä tekijöinä. Eri tilavuusyhtälöiden soveltamisen haasteena ovat eri maiden vaihtelevat runkotilavuuden määritelmät. Joissain maissa runkotilavuuteen laskettiin runkoaines vain tiettyyn yläläpimittaan asti. Lisäksi tilavuutta ennustetaan yleisesti muillakin puusta mitattavilla muuttujilla kuin vain läpimitalla ja pituudella, mutta yhteenvedomme ei kata näitä yhtälöitä. Useimpien maiden valtakunnallisissa metsävarojen inventoinneissa käytettyjä yhtälöitä ei ole lainkaan julkaistu, minkä vuoksi ne eivät ole tässä tutkimuksessa mukana eikä niitä voi verrata tieteellisissä julkaisuissa esitettyihin yhtälöihin.

Kattavan eurooppalaisten biomassaa- ja tilavuusyhtälöiden kokoaminen on haastavampaa kuin vastaa-



vien jo tehtyjen pohjoisamerikkalaisten (Tritton ja Hornbeck 1982, Ter-Mikaelian ja Korzukhin 1997, Jenkins ym. 2004) ja australialaisten (Eamus ym. 2000, Keith ym. 2000) kokoelmien tekeminen. Tämä johtuu suuresta määrästä eri maita ja eri maiden metsäntutkimuksen ja metsien inventoinnin traditioista. Lisäksi eurooppalaisia yhtälöitä on julkaistu monella eri kielellä.

Tässä tutkimuksessa koottuja biomassayhtälöitä sovellettaessa on syytä muistaa, että ne edustavat usein vain yhtä tai muutamaa metsikköä. Yhteenvedoa voidaan käyttää perustana sopivan tilavuus- tai biomassayhtälön valinnassa mikäli edustavaa kansallista vaihtoehtoa ei ole käytettävissä. Lisäksi koottuja yhtälöitä voidaan käyttää paikallisiin aineistoihin perustuvien yhtälöiden yleistettävyyttä arvioitaessa. Tällöin tulee kuitenkin huomioida mahdolliset erot määritelmissä mitä yhtälön on tarkoitettu ennustavan. Koostemme perusteella on mahdollista päästä nopeasti vertailemaan eri yhtälöitä ja niiden ennusteita, mutta yhtälöitä sovellettaessa erikseen määriteltyyn kohteeseen on aina syytä tutustua myös alkuperäiseen julkaisuun ja yhtälön sovellutusalueen mahdollisiin rajoituksiin. Työmme viitoittanee tietä ja auttaa löytämään lukuisia tietolähteitä biomassan ja runkotilavuuden ennustamiseen.

## Lähteet

- Eamus, D., McGuinness, K. & Burrows, W. 2000. Review of allometric relationships for estimating woody biomass for Queensland, the Northern Territory and Western Australia. National Carbon Accounting System Technical Report 5A. Australian Greenhouse Office, Canberra. 56 s.
- Jenkins, J.C., Chojnacky, D.C., Heath, L.S. & Birdsey, R.A., 2004. Comprehensive database of diameter-based biomass regressions for North American tree species. Gen Tech. Rep. NE-319. US Forest Service. 45 s.
- Keith, H., Barrett, D. & Keenan, R. 2000. Review of allometric relationships for estimating woody biomass for New South Wales, the Australian Capital Territory, Victoria, Tasmania, and South Australia. National Carbon Accounting System Technical Report 5B. Australian Greenhouse Office, Canberra. 114 s.
- Marklund, L.G. 1987. Biomass functions for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in Sweden. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogstaxering, Rapport 43. 127 s.
- 1988. Biomassafunktioner för tall, gran och björk i Sverige. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogstaxering, Rapport 45. 73 s.
- Ter-Mikaelian, M.T. & Korzukhin, M.D. 1997. Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management* 97: 1–24.
- Tritton, L.M. & Hornbeck, J.W. 1982. Biomass equations for major tree species of the Northeast. U.S. Department of Agriculture, Northeastern Forest Experiment Station, General Technical Report NE-69. 46 s.
- Zianis, D. & Mencuccini, M. 2003. Aboveground biomass relationship for beech (*Fagus moesiaca* Cz.) trees in Vermio Mountain, Northern Greece, and generalised equations for *Fagus* spp. *Annals of Forest Science* 60: 439–448.

■ FM Petteri Muukkonen & MMT Raisa Mäkipää, Metla, Vantaan toimintayksikkö  
Sähköposti: petteri.muukkonen@metla.fi,  
raisa.makipaa@metla.fi