

Arto Haara

Kuvioittaisen arvioinnin virheiden simulointimenetelmiä

Seloste artikkelista: Haara, A. 2003. Comparing simulation methods for modelling the errors of stand inventory data. *Silva Fennica* 37(4): 477–491.

Suomessa metsäsuunnittelun lähtöaineistot kerätään kuvioittaisella arvioinnilla, joka on hyvin subjektiivinen inventointimenetelmä. Niinpä käytettävät aineistot voivat olla hyvinkin vaihtelevan tasoisia. Lähtöaineistojen virheellisyyttä ei kuitenkaan huomioida käytännön suunnittelussa eikä edes suurimmassa osassa metsäsuunnittelun tutkimuksista. Tutkimuksen ongelman lähtökohtana on sopivien aineistojen puute: kuvioittaisen arvioinnin aineistoja on saatavilla riittävästi, mutta niiden tarkkuudesta ei ole tietoa. Tarkistusmittausaineistojen saatavuus on huonoa, ja varsinkin useamman ajankohdan kuvioittaiset arvoinnit ja tarkistusmittaukset samalta alueelta puuttuvat. Sopivan empiirisen tutkimusaineiston puuttuessa lähtöaineistoihin on yritetty simuloida kuvioittaisen arvioinnin virheitä. Tällöin ongelmaksi on muodostunut maastoarvioinnin mitausvirheiden jäljittelyminen.

Tutkimuksen tavoitteena oli vertailla erilaisia kuvioittaisen arvioinnin virheiden generointimenetelmiä ja tutkia virheiden vaikutusta kuvioittaisiin ja puulajeittaisiin inventointituloksiin.

Tutkimusaineistona käytettiin kahta erillistä tarkistusmittausaineistoa: 1 842 metsikkökuviota Pohjois-Suomesta ja 41 metsikkökuviota Itä-Suomesta. Tarkistusmittauksessa kummankin aineiston metsiköihin sijoitettiin systemaattisella otannalla ympyräkoaloja, joilta mitattiin koe- ja lukupuut. Koalojen puustot yhdistämällä saatiin kuvion puustotunnukset, joihin kuvioittaisella arvioinnilla saatuja puus-

totunnuksia verrattiin. Varsinaisen kuvioittaisen arvioinnin suorittivat metsäsuunnittelun ammattilaiset. Laajemmasta tarkistusmittausaineistosta valittiin satunnaisotannalla 90 metsikköä, joita käsiteltiin omana aineistonaan. Vertailtavilla menetelmillä generoitiin virheet tälle otanta-aineistolle sekä Itä-Suomen aineistolle. Saatuja virheitä verrattiin empiirisiin virheisiin. Laajemman aineiston jäljelle jääneitä 1 752:ta metsikköä pidettiin ns. referenssiaineistona, josta laskettiin puustotunnusten virheiden välisiä korrelaatioita, ja jonka metsiköiden puustotunnusten virheitä käytettiin tarvittaessa empiirisenä virheinä.

Tutkimuksessa vertailtiin neljää eri menetelmää: 1) Monte Carlo -menetelmää, jossa puusto-ositteiden arviointivirheet generoitiin log-normaalijakaumilla, 2) Monte Carlo -menetelmää, jossa pohjapinta-alamediaanipuun puustotunnusten virheet ja puusto-ositteiden pohjapinta-alavirheet generoitiin multinormaalijakaumilla, 3) lähimmän naapurin menetelmää ja 4) empiirinen virhe -menetelmää. Käytetyt multinormaalijakaumat olivat log-normaalijakaumia. Kuvioittaisessa arvioinnissa puusto-ositteiden pohjapinta-alamediaanipuun puustotunnukset mitataan samasta puusta, joten tunnusten virheiden voidaan olettaa olevan korreloituneita. Lisäksi metsikön puusto-ositteiden pohjapinta-alojen virheet voivat olla korreloituneita puulajisuhteiden määrittämisessä. Näiden oletusten pohjalta tutkimuksessa kokeiltiin multi-normaalijakaumia virheiden generointiin. Lähimmän naapurin menetelmässä tarkasteltavalle kuviolle haettiin referenssiaineistosta puustotunnuksiltaan ja puulajiosuuksiltaan kuviota lähimpänä oleva naapurikuviota, jonka arviointivirheet kopioitiin tarkasteltavalle kuviolle. Kullakin simulointikerralla metsikölle haettiin eri naapurin virheet siten, että ensimmäisellä simulointikerralla käytettiin lähimmän naapurin virheitä, toisella kerralla käytettiin toiseksi lähimmän naapurin virheitä jne. Empiirinen virhe -menetelmässä referenssiaineisto luokiteltiin puulajeittain läpimittaluokkiin. Menetelmässä valittiin

ensin se läpimittaluokka, johon tarkasteltavan kuvion puusto-osite kuului. Kullakin simulointikerralla tästä läpimittaluokasta valittiin satunnaisotannalla yksi kuvio, jonka virheet generoitiin tarkasteltavalle kuviolle. Kummallakin Monte Carlo -menetelmällä kokeiltiin lisäksi sisällyttää tarkistusmittauksessa havaitut arviointivirheiden trendit generoituihin virheisiin yksinkertaisilla malleilla.

Tutkimuksessa pohjapinta-alamediaanipuun puustotunnusten virheillä (läpimitta, pituus, ikä) havaittiin selvä positiivinen korrelaatio tarkistusmittausaineistossa. Lisäksi sekametsien puusto-ositteiden pohjapinta-alojen virheet korreloivat jonkin verran: metsikön yhden puusto-ositteen pohjapinta-alan yliarvio johti usein toisen ositteen pohjapinta-alan aliarvioon. Tarkistusmittausaineistossa metsikön pohjapinta-alan mittausvirheistä löytyi selvä trendi: vähäpuustoisten kuvioiden pohjapinta-ala pyrittiin yliarvioimaan ja runsaspuustoisten kuvioiden pohjapinta-ala pyrittiin aliarvioimaan. Monte Carlo -simuloinneissa pohjapinta-alalle laadittiin yksinkertainen malli, jolla jäljiteltiin tätä trendiä.

Monte Carlo -menetelmä, jossa käytettiin multinormaalijakaumia, havaittiin vertailluista virheiden generointimenetelmistä joustavimmaksi. Menetelmällä saavutettiin vaadittavat virheiden hajonnat ja pohjapinta-alamediaanipuun puustotunnuksille generoidut virheet tulivat toisistaan riippuviksi. Lisäksi pohjapinta-alan arviointivirheen trendi pystyttiin huomioimaan hyvin. Menetelmä sopii hyvin tilanteisiin, joissa halutaan tarkastella esimerkiksi lähtöaineiston virhetason vaihtelun vaikutusta simulointi- ja optimointituloksiin. Mikäli käytössä on kuitenkin laaja referenssiaineisto ja kun halutaan jäljitellä mahdollisimman hyvin käytännön virherakenteita, ovat lähimmän naapurin menetelmä, ja ehkä myöskin empiiristen virheiden menetelmä, varteenotettavia vaihtoehtoja.

■ MMM Arto Haara, Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. Sähköposti arto.haara@joensuu.fi

Raija Laiho, Timo Penttilä ja Jukka Laine

Maan ravinnepitoisuuksien ja tiheyden vaihtelu suometsäkuvioiden sisällä

Seloste artikkelista: Laiho, R., Penttilä, T. & Laine, J. 2004. Variation in soil nutrient concentrations and bulk density within peatland forest sites. *Silva Fennica* 38(1): 29–41.

Turpeen ravinnetunnukset voivat vaihdella huomattavasti paitsi eri kasvupaikkatyyppejä edustavien suo- tai metsikkökuvioiden välillä, myös niiden sisällä. Tällä on suurta käytännön merkitystä silloin kun otetaan maanäytteitä metsikön ravinnetilän arvioimiseksi. Mitä enemmän ravinnetunnukset metsikön sisällä vaihtelevat, sitä enemmän on otettava osanäytteitä luotettavan keskiarvoravinnetunnuksen saamiseksi. Jos osanäytteitä otetaan liian vähän, niiden avulla saatava tulos voi olla aivan sattumanvarainen. Tällä on erityisen suuri merkitys haluttaessa seurata maan ominaisuuksien muutosta ajassa.

Tutkimuksessa tarkasteltiin kasvillisuuden perusteella rajattujen suokuvioiden sisäistä vaihtelua maaperän ravinnepitoisuuksissa (P, K, Ca, Mg, Fe, mg g^{-1} ; Mn, Zn, $\mu\text{g g}^{-1}$) ja tiheydessä (kg m^{-3}). Aineistona oli 11 koalaa, kooltaan 30–40 m x 30–40 m, jotka edustivat ojittamattomia (2) ja ojitetuja (9) varsinaisia sararämeitä (ojitettuna Ptkg(II)). Koalat sijaitsivat Orivedellä ja Pyhäjärvellä. Kultaikin koalalta oli otettu maanäytteet 20:stä koko koalan systemaattisesti kattavasta pisteestä. Jokaisesta pisteestä otettiin näytteet syvyyksiltä 0–10 cm, 10–20 cm ja 20–30 cm. Näytteenottopisteiden välinen pienin etäisyys oli 5–8 m koalasta riippuen. Näillä etäisyyksillä ei missään tutkitussa ominaisuudessa ollut merkitsevää spatiaalista autokorrelaatiota.

Vähiten metsiköiden sisällä vaihtelivat turpeen tiheys ja fosforipitoisuus. Koko 0–30 cm:n kerroksessa niiden suhteellista vaihtelua kuvaava variaatiokerroin (keskihajonta suhteessa keskiarvoon) oli keskimäärin noin 10 %. Emäskationien (K, Ca, Mg) keskimääräinen variaatiokerroin 0–30 cm:n kerroksessa vaihteli välillä 20–30 %, sinkillä se oli noin 40 %, ja mangaanilla suurin, 75 %. Typpipitoisuuden vaih-

telua ei tutkittu. Vaihtelun määrässä ei ollut selviä eroja ojittamattomien ja ojitettujen koealojen välillä muissa mitatuissa tunnuksissa, mutta mangaanin vaihtelu oli vähäisempää ojitetuilla koealoilla. Näytteenottoisyvyys aiheutti yli 50 % kokonaisvaihtelusta kaikissa muissa tunnuksissa paitsi tiheydessä sekä fosforin ja raudan pitoisuuksissa.

Jos tavoitteeksi asetetaan, että näytteenotolla metsikölle saatavien keskiarvotunnusten teoreettinen suurin poikkeama on enintään 10 % metsikön ”todellisesta” keskimääräisestä ominaisuudesta, riittää 0–30 cm:n turvekerrokselle 5 osanäytettä silloin, kun ollaan kiinnostuneita vain turpeen tiheydestä ja fosforipitoisuudesta. Kaikilla muilla tutkituilla ravinteilla (Ca, K, Mg, Fe, Mn, Zn) vastaavaan tarkkuuteen pääseminen edellyttää selvästi suurempaa osanäyttemäärää, mangaanilla jopa noin kahta sataa. Jos halutaan tarkastella erillisten 10 cm:n kerrosten tunnuksia, tarvittavat näyttemäärät ovat vielä suurempia. Koska lähes kaikissa tunnuksissa on selvää syvyysuuntaista vaihtelua jopa 0–30 cm:n kerroksen sisällä, näytteenoton onnistumisen kannalta on myös erittäin tärkeää, että näytteenoton ”nollaraja”, eli se raja, josta alaspäin näytteet otetaan (yleensä elävän kasvillisuuden alaraja), määritetään hyvin huolellisesti.

■ Dos. Raija Laiho, dos. Jukka Laine, Helsingin yliopisto, metsäekologian laitos; vanh. tutkija Timo Penttilä, Metla, Vantaan tutkimuskeskus
Sähköposti raija.laiho@helsinki.fi

Pauline Stenberg, Miina Rautiainen, Terhikki Manninen, Pekka Voipio ja Heikki Smolander

Satelliittikuvista lasketut kasvillisuusindeksit suomalaisen havumetsän neulasalan kartoituksessa

Seloste artikkelista: Stenberg, P., Rautiainen, M., Manninen, T., Voipio, P. & Smolander, H. 2004. Reduced simple ratio better than NDVI for estimating LAI in Finnish pine and spruce stands. *Silva Fennica* 38(1): 3–14.

Satelliittikuvat tarjoavat tehokkaan työvälineen laaja-alaiseen metsien vihreän biomassan seurantaan, mikäli menetelmät saadaan kehitettyä riittävän luotettaviksi. Vihreää biomassaa kuvataan lehtialaindeksillä (LAI) eli kasvuston lehtien yhteenlasketulla toispuolisella pinta-alalla maapinta-alaa kohti. LAI on keskeinen suure, kun määritetään metsikön perustuotantoon käytettävissä olevaa energiaa ja kun tarkkaillaan metsien terveydentilaa ja kasvua.

Tutkimuksessaamme tarkastelimme Landsat 7 ETM -satelliittikuvista laskettujen kasvillisuusindeksien käyttömahdollisuutta suomalaisten havumetsien puuston LAI:n kartoittamisessa. Boreaalisten havumetsien erityisiä haasteita LAI:n optisessa kaukokartoituksessa ovat kuusen ja männyn syvät ja rakenteeltaan ryhmittyneet latvukset, jotka tuottavat erilaisen riippuvuuden latvustosta heijastuneen säteilyn ja LAI:n välille kuin rakenteeltaan homogeenisimmat metsät. Lisäksi satelliittikuvien tulkintaa vaikeuttaa latvuston läpi näkyvä monipuolinen aluskasvillisuus, jonka LAI:n erottaminen puuston LAI:sta on vaikea.

Mittaukset ja satelliittikuvien tulkinta tehtiin 683:lle kuusi- ja mäntyvaltaiselle koealalle Puumalassa ja Suonenjoella. Koealat sijaitsevat säännöllisissä 1 km²:n mittaushiloissa 50 metrin etäisyydellä toisistaan niin, että Puumalassa oli 336 alaa ja Suonenjoella 327 alaa. Koealoilta mitattiin lehtialaindeksi Li-Corin LAI-2000 Plant Canopy Analyzer -laitteella. Tämän jälkeen muodostettiin mallien laatimista varten laskennalliset yksiköt (”koealat”)

pieni- ja suuren spatiaalisen vaihtelun ja mahdollisten mittausepävarmuuksien minimoimiseksi laske-
malla painotetut keskiarvot mitatuille LAI-arvoille ja satelliittikuvien heijastussuhteille 70 metrin säteellä kunkin mittaushilapisteen ympäriltä. Tällä tavoin keskiarvoistettujen LAI-arvojen vaihteluväli oli 0,36–3,72.

Satelliittikuvista laskettiin kolme kasvillisuusindeksiä LAI:n ennustamiseen: runsaasti maailmanlaajuisesti käytetyt NDVI (normalized difference vegetation index) ja SR (simple ratio) sekä vähemmän tunnettu RSR (reduced simple ratio), jossa mukana on punaisen ja lähi-infrapuna-aallonpituuksien lisäksi myös keski-infrapunasäteily. Kaikki kolme kasvillisuusindeksiä korreloivat positiivisesti LAI:n kanssa, mutta vain RSR:n sisältävää mallia voitiin pitää dynaamisena. Kun mukana olivat kaikki koealat ($n=683$), RSR toimi jo verrattain hyvin ($r^2=0,63$), ja kun malliin otettiin mukaan vain LAI:n suhteen tasaiset alat, selitti malli vielä enemmän vaihtelusta ($r^2=0,75$).

RSR:ää käyttäen tutkimuksemme tuotettiin satelliittikuviin perustuvat LAI-kartat tutkimusalueista, joita verrattiin mittauksiin perustuviin karttoihin. Yhteensopivuus karttojen välillä oli hyvä. Tutkimuksemme tuloksista voidaan todeta, että RSR sopii LAI:n ennustamiseen NDVI:tä ja SR:ää paremmin erityisesti suomalaisissa havumetsissä, joissa kuviokokoo on tyypillisesti pienekkö ja raja-alueita näin ollen runsaasti.

■ MMT Pauline Stenberg, FM Miina Rautiainen, Helsingin yliopisto, metsäekologian laitos; TkT Terhikki Manninen, Ilmatieteen laitos; Pekka Voipio, MMT Heikki Smolander, Metla, Suomenjoen tutkimusasema
Sähköposti pauline.stenberg@helsinki.fi

Martti Varmola, Hannu Salminen ja Mauri Timonen

Kylvömännikön harvennusreaktio ja kasvunvaihtelu pohjoisella metsänrajalla

Seloste artikkelista: Varmola, M., Salminen, H. & Timonen, M. 2004. Thinning response and growth trends of seeded Scots pine stands at the arctic timberline. *Silva Fennica* 38(1): 71–83.

Tutkimuksessa selvitettiin männikön harvennuksen vaikutus puuston kasvuun ja kasvunvaihteluun erittäin äärevissä olosuhteissa pohjoisella metsänrajalla, jossa havupuut eivät tavallisesti muodosta sulkeutuneita metsiköitä lainkaan.

Tutkimuksen aineiston muodostivat kaksi kylvömännikköä, jotka sijaitsivat Inarin Pakanajoella ja Utsjoen Mierasrovassa. Alueet oli kylvetty vuosina 1929 ja 1939. Ne sijaitsivat 90 ja 190 metrin korkeudella merenpinnasta. Normaalikauden 1961–90 lämpösumma oli Pakanajoella 667 d.d. ja Mierasrovassa 618 d.d. Taimikot kuuluivat Metsähallituksen parhaiten onnistuneisiin viljelyihin metsänrajalla tai sen pohjoispuolella.

Harvennuskoe perustettiin vuosina 1985–86, jolloin taimikoiden valtapituus oli Pakanajoella 6,7–7,1 ja Mierasrovassa 5,8–6,1 metriä. Runkoluvut olivat vastaavasti 1 440–1 920 ja 1 750–2 390 puuta/ha. Kummassakin taimikossa 40 × 40 metrin koeruidut harvennettiin neljänä toistona kasvatustiheyksille 300, 550, 800, 1 050, 1 300 puuta/ha, joiden lisäksi yksi ruutu jokaisessa toistossa jätettiin käsittelemättä. Koejärjestelynä oli satunnaistettujen lohkojen koe. Puustot mitattiin sekä harvennusvaiheessa että 13–14 vuotta harvennusten jälkeen syksyllä 1998, jolloin valtapituus vaihteli 8,3:n ja 8,9 metrin välillä.

Puuston kuolleisuus harvennetuilla ruuduilla oli vähäistä. Suurimmat puuston vähennykset aiheutuivat paikallisten poromiesten aitauiden teosta Pakanajoella. Harventamattomilla ruuduilla runkoluku väheni kuitenkin keskimäärin 131 runkoa/ha.

Valtapituuden kasvu oli jokseenkin riippumaton harvennusvoimakkuudesta. Kummallakin alueel-

la harventamattomien ruutujen valtapituus oli kuitenkin pienin, mikä viittaa ylitiheyden vaikuttavan puuston kehitykseen näissä oloissa. Myös valtaläpimitta oli tilastollisesti samalla tasolla kaikissa harvennusvoimakkuuksissa, joskin harventamattomilla ruuduilla se jäi lähes yhden senttimetrin pienemmäksi kuin voimakkaimmassa käsittelyssä.

Puuston pohjapinta-ala ja tilavuus olivat sitä suuremmat, mitä suurempi puuston runkoluku oli. Vuotuinen tilavuuskasvu vaihteli Pakanajoella välillä 0,7–1,7 m³/ha ja Mierasrovassa välillä 1,2–2,8 m³/ha.

Vuonna 1998 valtaosa, 93–99 % puustosta, oli saavuttanut kuitupuun mitat, mutta sahapuita ei koeruuduilla vielä ollut. Vaikka kokonaistuotos tähän mennessä olikin suurin puuston tiheydellä 1 300 puuta/ha, noin 1 000 puuta/ha näyttäisi kokonaisuudessaan olevan suositeltavin kasvatustiheys riukumetsävaiheessa.

Huolimatta erittäin äärevistä olosuhteista puut reagoivat harvennukseseen suhteellisen nopeasti. Läpimitan kasvun lisääntyminen havaittiin kolmantena vuotena harvennuksesta ja se oli sitä suurempi, mitä voimakkaampi harvennus oli. Puiden kasvunvaihtelu oli hyvin samansuuntaista eri harvennusvoimakkuuksilla.

Koemetsiköiden puuston kasvu vastasi pituusboniteetiltaan $H_{100} = 11\text{--}12$ metrin (Pakanajoki) ja 13–14 metrin (Mierasrova) viljelymänniköiden kehitystä. Tämä merkitsee kiertoajan kuluessa 1,0–1,5 m³:n keskikasvua hehtaarilla. Tulosta voidaan pitää erinomaisena metsänrajalla, ja se vastaa kuivahkon kannaan keskikasvua Pohjois-Lapissa.

Suotuisa lämmin ilmastojakso viljelyn aikana ja sen jälkeen on ensiarvoisen tärkeää metsänrajan tuntumassa olevien viljelymänniköiden kehitykselle. Taimikon sulkeuduttua männikkö näyttää kuitenkin kestävä tuhoja ja kasvavan suhteellisen vakaasti viileinäkin ilmastojaksoina. Koska kasvuresurssit ovat hyvin rajalliset metsänrajalla, taimikoiden huolellinen hoito on tarpeen ja kasvatustiheys on syytä pitää kiertoajan loppupuolella alhaisempana kuin eteläisemmässä Lapissa.

■ MMT Martti Varmola, MMM Hannu Salminen, MH Mauri Timonen, Metla, Rovaniemen tutkimusasema. Sähköposti martti.varmola@metla.fi