

Miina Rautiainen^{1,2}, Nea Kuusinen¹, Aarne Hovi¹ ja Titta Majasalmi¹

Boreaalisten metsien albedosta

Rautiainen M., Kuusinen N., Hovi A., Majasalmi T. (2020). Boreaalisten metsien albedosta. Metsätieteen aikakauskirja 2020-10323. Katsaus. 18 s. <https://doi.org/10.14214/ma.10323>

Tiivistelmä

Metsien albedon vaihtelun selvittäminen antaa tietoa energiavirroista maan ja ilmakehän välillä sekä tarkennettuja lähtötietoja ilmastomallinnukseen. Siihen, pitäisikö albedon vaihtelu erityyppisten metsien välillä ottaa huomioon ilmastopolitiikassa tai metsänhoidon päätöksenteossa, ei pystytä vastaamaan ennen kuin kaikki metsien ilmastoon vaikuttavat tekijät on arvioitu samanaikaisesti. Boreaalisten metsien albedolla on omat erityispiirteensä verrattuna muiden kasvillisuusvyöhykkeiden albedoon; metsiemme albedo vaihtelee muun muassa lumitilanteen, puulajikoostumuksen, metsän rakenteen sekä aluskasvillisuuden mukaan. Tässä katsausartikkelissa kerromme mikä albedo on, miksi siitä ollaan kiinnostuneita, miten metsän albedoa on mahdollista arvioida ja mitkä tekijät vaikuttavat siihen. Tarkastelumme painottuu suomalaisiin metsiin. Lisäksi tarkastelemme Suomen metsien albedon kehitystä viime vuosikymmenten aikana ja pohdimme mitä seikkoja boreaalisten metsien albedosta ei vielä ymmärretä.

Asiasanat heijastavuus; havumetsä; satelliitti; albedotuote; heijastusmalli; ilmasto

Yhteystiedot ¹Rakennetun ympäristön laitos, Insinööritieteiden korkeakoulu, Aalto-yliopisto, Espoo; ²Elektroniikan ja nanotekniikan laitos, Sähkötekniikan korkeakoulu, Aalto-yliopisto, Espoo

Sähköposti miina.a.rautiainen@aalto.fi

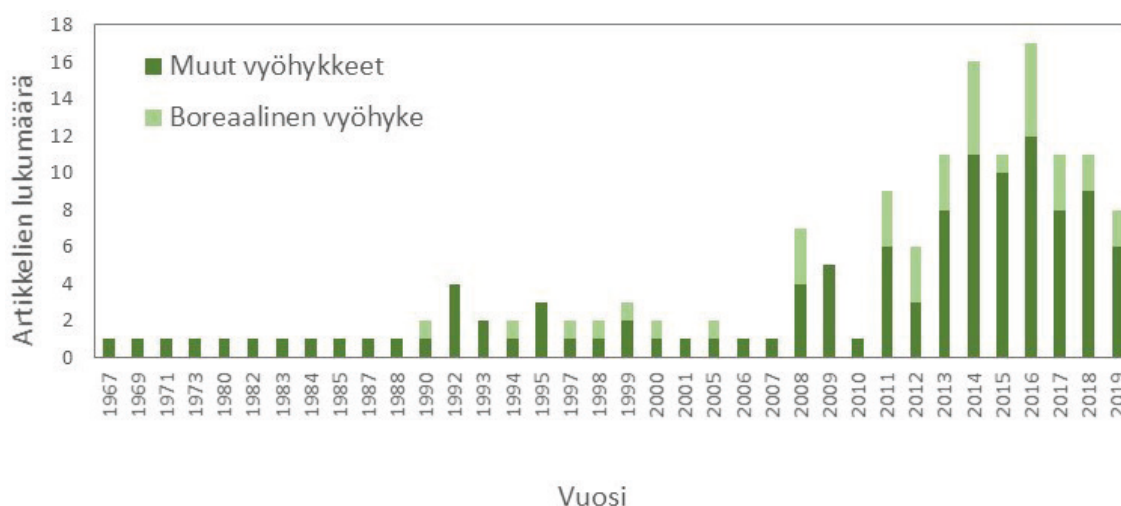
Hyväksytty 5.5.2020

1 Johdanto

Ilmastonmuutokseen varautuminen ja pyrkimykset sen vaikutusten ymmärtämiseen ovat toimineet kimmokkeena metsien käytön tarkastelemiseen ja kirjoittaneet niin laajaa yhteiskunnallista keskustelua kuin myös tieteellistä tutkimusta. Jos metsien merkitystä ilmastonmuutoksen torjunnassa tarkastellaan vain hiilensidonnan kautta, saadaan puutteellinen kokonaiskuva asiasta. Puhtaasti luonnontieteellisestä näkökulmasta on tärkeää huomioida myös metsien vaikutukset ilmastoon niiden heijastaman auringonsäteilyn (eli albedon) ja vapauttamien aerosolien kautta.

Jo vuonna 1979 Sagan ym. nostivat esille ihmisen roolin metsäalueiden albedon muokkaamisessa ihmiskunnan historian ajan, ja mm. spekuloidivat, miten merkittävä rooli metsien hakkaamisella voisi olla albedon kasvattamiselle (ja sitä kautta ilmaston muokkaamiselle) niillä maapallon alueilla, joilla on lumiset talvet. Suomalaisten metsäntutkijoiden parissa metsän albedo ja sen mahdolliset vaikutukset ilmastoon ovat nousseet aktiivisen keskusteluun vasta viime vuosien aikana, minkä myötä albedo on ollut teemana monissa tutkimusprojekteissa. Metsien albedoon liittyviä tutkimuksia onkin julkaistu ahkerasti viime vuosina (Kuva 1). Albedoa on myös tarkasteltu erilaisissa yhteyksissä viimeaikaisissa suomalaisissa väitöskirjoissa: on tutkittu esimerkiksi albedon riippuvuutta metsän rakenteesta ja vuodenaikasta (Kuusinen 2014), perehdytty lumen albedoon ja sen kausivaihteluihin koko boreaalisella vyöhykkeellä (Anttila 2019) ja sovellettu albedoa osana maankäyttösektorin ilmastopolitiikkaa (Rautiainen 2019).

Boreaalisten metsien albedolla on omat erityispiirteensä verrattuna muiden kasvillisuusvyöhykkeiden albedoon. Esimerkiksi lumiset talvet, matalat auringonkulmat ja havupuuvaltaisuus johtavat siihen, että muilta kasvillisuusvyöhykkeiltä saatuja tuloksia ei ole helppo yleistää boreaaliselle vyöhykkeelle. Tässä artikkelissa luomme katsauksen boreaalisten metsien albedoon. Kerromme mikä albedo on, miksi siitä ollaan kiinnostuneita, miten metsän albedoa on mahdollista arvioida ja mitkä tekijät vaikuttavat siihen. Tarkastelumme painottuu suomalaisiin metsiin. Lisäksi tarkastelemme Suomen metsien albedon kehitystä viime vuosikymmenten aikana ja kuvailemme, miten metsän albedo on huomioitu ilmastomalleissa. Lopuksi pohdimme mitä seikkoja boreaalisen metsän albedosta ei vielä ymmärretä.



Kuva 1. Metsän albedoa käsittelevät englanninkieliset, vertaisarvioidut artikkelit. Lähde: Web of Science, Clarivate Analytics. Haut tehty artikkelien otsikkotietojen perusteella tammikuussa 2020.

2 Mikä on albedo?

Albedolla tarkoitetaan kappaleeseen osuneen ja siitä heijastuneen säteilyn suhdetta, ja joskus kuu-
leekin käytettävän albedosta myös suomenkielistä termiä heijastavuus. Teoreettisen täysin säteilyä
heijastavan valkoisen pinnan albedo on 100 % (tai 1). Vastaavasti täysin musta pinta absorboi
kaiken siihen osuvan säteilyn, joten sen albedo on 0 % (tai 0). Luonnossa olevien tai ihmisten
rakentamien kohteiden albedo sijoittuu näiden väliin niin, että vedet ovat kaikkein tummimpia
ja lumi tai jäätiköt kirkkaimpia. Koko maapallon albedoon (engl. planetary albedo) vaikuttavat
niin meret, jäätiköt, aavikot kuin kasvillisuuskin, ja koska valtaosa maapallon pinnasta on merien
peittämää, on niillä suuri merkitys koko maapallon albedon määräytymisessä. Lisäksi pilvillä ja
ilmakehän koostumuksella on merkittävä rooli. Maapallon albedoksi on arvioitu noin 0,3. Maapal-
lon pinnan vaikutus tähän maapallon albedoon on ilmakehässä tapahtuvan heijastuksen ja sironnan
vuoksi melko pieni, noin 12 % (Donohoe ja Battisti 2011).

Ilmakehän läpi saapuu auringonsäteilyä aallonpituusalueella, joka vastaa n. 280–4000 nano-
metriä. Karkeasti ottaen hieman yli puolet saapuvan säteilyn energiasta on lähi-infrapuna-alueella
(eli > 700 nm), hieman alle puolet fotosynteesistä aktiivisen säteilyn alueella (eli PAR-alueella,
n. 400–700 nm), ja vain vähän ultraviolettisäteilyn alueella (n. 280–400 nm). Albedo voidaan
määritellä niin, että se kattaa kaikki nämä aallonpituudet. Silloin puhutaan leveäkaistaisesta
albedosta (engl. broadband albedo tai joskus shortwave albedo). Vastaavasti voidaan puhua vain
PAR-alueen albedosta tai jopa yksittäistä aallonpituutta vastaavasta albedosta (engl. narrow-band
tai spectral albedo).

Albedo voidaan määritellä usealla eri tavalla riippuen siitä, miten saapuvan säteilyn oletetaan
siroavan ilmakehässä. Teoreettinen tapaus, jossa taivas näyttää mustalta (eli säteily saapuu vain
auringon suunnasta eikä siroa ilmakehässä) on saanut kuvaavan nimen ”mustan taivaan albedo”
(engl. black-sky albedo tai directional-hemispherical reflectance factor). Toinen ääripää, jolloin
säteily saapuu kohteeseen koko taivaankannen yli kaikista kulmista, on puolestaan nimeltään
”valkoisen taivaan albedo” (engl. white-sky albedo tai bi-hemispherical reflectance factor). Tavan-
omaista tilannetta, jossa maapallon pinnalle saapuu niin suoraa kuin ilmakehässä sironnutta säteilyä,
kutsutaan ”sinisen taivaan albedoksi” (engl. blue-sky albedo tai actual albedo). Näitä ja muita
heijastuneeseen säteilyyn liittyviä käsitteitä on tiivistetysti esitetty esim. Schaepman-Strubin ym.
(2006) artikkelissa. Sinisen taivaan albedo korreloi voimakkaasti mustan taivaan albedon kanssa,
jos ilmakehä on pilvetön ja kirkas. Pilvisyyden kasvaessa tai ilmakehän läpinäkyvyyden heiken-
tyessä (eli aerosolien määrän kasvaessa) sinisen taivaan albedo lähestyy valkoisen taivaan albedoa.
Metsien mustan ja valkoisen taivaan albedot eroavat toisistaan etenkin matalilla aurinkokulmilla,
mutta simulointitutkimuksen mukaan tyypillisillä boreaalisen vyöhykkeen kesäajan (keskipäivän)
aurinkokulmilla kaikki kolme albedoa ovat hyvin samanlaisia (Hovi ym. 2016). Mahdollisten
erojen takia olisi tärkeää, että tutkimuksissa, jotka raportoivat albedoarvoja kerrottaisiin, miten
albedo on määritelty.

Saman kohteen albedo muuttuu ajassa: se riippuu mittaushetken auringon kulmasta ja
ilmakehän tilasta, joten yksityiskohdat liittyen mittausteoriaan on myös syytä olla tiedossa.
Esimerkiksi ilmastomuutostutkimuksia varten voidaan kuitenkin tarvita albedoarvoista keskiarvoja
pidempien ajanjaksojen, jopa koko vuoden, yli. Tällaisten ”integroitujen albedojen” laskeminen
ja erityisesti ennustaminen tulevaisuuteen on sangen haastavaa.

3 Miksi albedosta ollaan kiinnostuneita?

Maanpeite vaikuttaa paikalliseen ilmastoon säätelemällä sidotun auringonsäteilyn määrää sekä sen poistumista havaittavan ja latentin (eli haihtumiseen kuluvan) lämmön voina sekä lämpösäteilynä. Vuolla tarkoitetaan ominaisuuden virtausnopeutta (kuvitteellisen) pinnan läpi. Joskus maankäytön aiheuttaman muutoksen energiavoiden jakautumisissa voi havaita konkreettisesti; kesäpäivänä nurmikko tuntuu jalan alla viileämmältä kuin hiekka tai asfaltti, koska kasvipeite kuluttaa suhteellisesti suuremman osuuden sidotusta auringonsäteilyn energiasta haihduntaan. Laajemmalla alueella energiavoiden jakautuminen vaikuttaa muun muassa sateisiin, jotka vuorostaan vaikuttavat maanpeitteeseen ja siten säteilyenergian sitoutumiseen ja poistumiseen.

Maanpinnalle jäävän säteilyn energia eli nettosäteily koostuu lyhytaaltoisen (n. 0,3–5 μm) ja pitkäaaltoisen (n. 5–100 μm) säteilyn energiasta. Mitä suurempi on pinnan albedo, sitä suurempi osuus pinnalle saapuvasta lyhytaaltoisen säteilyn energiasta heijastuu takaisin taivaalle. Lyhytaaltoinen säteily on joko suoraa tai ilmakehässä sironnutta auringonsäteilyä, kun taas pitkäaaltoinen lämpösäteily emittoituu ilmakehän pilvistä ja hiukkasista sekä maasta. Nettosäteily jakautuu karkeasti havaittavan ja latentin lämmön voiksi tai johtuu lämpönä maahan. Osa kasvillisuuden sitomasta energiasta muuttaa muotoaan fotosynteesissä.

Kohteen albedo sekä sidotun energian jakautuminen lämpövoihin vaihtelee eri maankäyttötyyppien välillä. Lumi voi heijastaa lähes kaiken sille osuvan lyhytaaltoisen säteilyn, ja myös meren tai järven jäätyminen nostaa sen albedoa selvästi. Tärkeä ja paljon käytetty esimerkki albedon muutoksen vaikutuksesta ilmastoon onkin pohjoisen lumi- ja jääpeitteen hupeneminen ilmaston lämmetessä. Lumen ja jään sulaminen johtaa lisääntyneeseen säteilyn sitoutumiseen, ilman ja veden lämpenemiseen ja siten edelleen kutistuvaan jää- ja lumipeitteeseen.

Metsien vaikutusta ilmastoon arvioidaan yleensä hiilensidonnan kautta. Metsään ja puutuotteisiin sitoutunut hiili on poissa ilmakehästä eikä siten estä lämpösäteilyn poistumista maapallolta. Metsien istutus puuttomille alueille sekä metsien kasvatus mahdollisimman tuottavina on siten usein edullista hiilensidonnan näkökulmasta. Varsinkin lumipeitteisillä seuduilla nämä toimet kuitenkin usein laskevat albedoa. Useissa tutkimuksissa ehdotetaan, että istutustoimet boreaalisella vyöhykkeellä saattaisivat kasvavasta hiilensidonnasta huolimatta lämmittää ilmastoa (esim. Betts 2000; Bathiany ym. 2010). Toisaalta myös lievästi vastakkaisia tuloksia on esitetty (Arora ja Montenegro 2011). Bright ym. (2014) ehdottivat, että havupuuston korvaaminen lehtipuilla niille sopivilla kasvupaikoilla viilentäisi ilmastoa Norjassa.

Pohjoiset metsät eivät kuitenkaan ole yhtenäinen ryhmä albedonsa tai energiataseensa suhteen. Metsän albedo vaihtelee muun muassa puulajikoostumuksen, metsän rakenteen sekä aluskasvillisuuden mukaan. Tutkimuksissa on esimerkiksi havaittu havumetsien sitovan enemmän auringonsäteilyä kuin lehtimetsien sekä kasvukauden että lumipeitteen aikana (esim. Betts ja Ball 1997). Tiedetään myös, että lehtimetsissä haihdunta on yleensä suurempaa kuin havumetsissä, joissa suhteellisesti suurempi osuus sidotusta säteilystä poistuu havaittavan lämmön vuona (Baldocchi ym. 2000).

4 Miten metsän albedoa voidaan arvioida?

Metsän albedoa voidaan arvioida kolmella eri tavalla: maastomittauksilla, satelliitti- tai lentomittauksilla tai heijastusmallinnuksen kautta. Maastomittaukset perustuvat pyranometrin tai vastaavan anturin käyttöön. Pyranometri mittaa tulevan auringonsäteilyn irradianssia (Wm^{-2}) koko puolivaruuden yli, toisin sanoen sen näkökenttä on 180 astetta. Laite rekisteröi suoraan leveäkaistaista albedoa eli keskiarvoistaa kaikkien auringonsäteilyn aallonpituuksien (esim. ~300–5000 nm) yli.

Albedomittausta varten kaksi pyranometriä (joista toinen katsoo taivaalle ja toinen maanpinnan suuntaan) nostetaan vaateroituna metsän yläpuolelle siirrettävän maston avulla tai sijoitetaan metsän keskellä olevaan torniin (esim. Riihelä ja Manninen 2008; Kuusinen ym. 2014). Maastomittausten avulla voidaan seurata albedon yksityiskohtaisia muutoksia vuorokauden tai vuodenaikojen yli yhdessä tai muutamassa metsikössä, mutta laaja-alaiset mittaukset, joilla kerättäisiin albedoaineistoja useista erilaisista metsistä, ovat käytännössä liian työläitä.

Kun halutaan seurata suurempien alueiden albedoa, ovat satelliittimittaukset avainasemassa. Albedon arvioiminen satelliittikuvien avulla onkin saanut laajaa kansainvälistä huomiota viimeisen kahden vuosikymmenen aikana – siitä saakka, kun ensimmäinen, kaikkien saatavilla oleva albedotuote MODIS-satelliittikuvista (Schaaf ym. 2002) julkaistiin. Nykyään satelliittikuvista tehdään jopa päivittäin globaaleja albedokarttoja eli albedotuotteita (Taulukko 1). Kun puhutaan satelliittimittauksiin perustuvasta albedosta, on tärkeää ymmärtää, että senkin taustalla on useita malleja ja oletuksia, toisin sanoen kyseessä ei ole suora havainto. Optiset satelliittisensorit, kuten MODIS, mittaavat maasta heijastunutta auringonsäteilyä yleensä vain yhdessä kulmassa. Albedo sen sijaan on määritelty koko puoliavaruuden yli. Tarvitaan siis malleja, jotka pystyvät muuntamaan yhdessä (tai muutamassa) suunnassa tehdyt heijastusmittaukset vastaamaan koko puoliavaruutta. Tällaisia malleja kutsutaan BRDF-malleiksi (engl. bidirectional reflectance distribution function, BRDF). Tyypillisen albedotuotteen takana on kolme laskentavaihetta: ensin satelliittikuvulle on tehty ilmakehäkorjaus (eli on poistettu ilmakehän vaikutus mitatuista heijastusarvoista), sen jälkeen käytetään BRDF-mallia muuntamaan yksittäisiä mittauskulmia kuvaava arvo vastaamaan koko puoliavaruuden yli määriteltyä albedoa, ja lopuksi kapeakaistainen satelliittimittaus muunnetaan leveäkaistaiseksi (eli saadaan yksi arvo, joka on keskiarvoistettu kaikkien satelliittisensorin mittaamien eri aallonpituuksien yli). Kuten mihin tahansa mallinnukseen, kaikkiin näihin kolmeen laskentavaiheeseen liittyy epävarmuuksia ja yksinkertaistuksia. Satelliittimittauksiin perustuviin albedotuotteisiin liittyy myös kaksi muuta haastetta: ne ovat tällä hetkellä usein spatiaaliselta resoluutioltaan varsin karkeita (Taulukko 1), eli ne eivät sovellu metsikkötason analyysihin suomalaismetsissä. Tiettyä pikseliä vastaava albedoarvo on saanut säteilyn monisironnan sekä BRDF-mallinnukseen tarvittavien eri kulmista tehtyjen havaintojen erilaisen spatiaalisen resoluution (Tan ym. 2006) vuoksi vaikutteita myös naapuripikseleistä, joissa voi olla hyvinkin erilaista metsää tai muita maanpeiteluokkia. Tulevaisuudessa on luvassa myös paremmin metsikkötasoa vastaavia albedotuotteita, joiden kehitystyö Landsat- ja Sentinel-satelliittikuvista on parhaillaan käynnissä (Li ym. 2018). Myös dronien käyttö pienten metsäalueiden albedon mittaamisessa lienee mahdollista tulevaisuudessa (Levy ym. 2018).

Taulukko 1. Esimerkkejä satelliittimittauksiin perustuvista maailmanlaajuisista albedotuotteista.

Albedotuote	Satelliitti	Spatiaalinen resoluutio	Ajallinen resoluutio	Ajanjakso	Viite
MODIS	Terra ja Aqua	500 m	1 vrk	2000 alkaen	Schaaf ym. 2002
MISR	Terra	275 m – 1 km	1 vrk	2000 alkaen	Diner ym. 2008
GLASS	Terra / Aqua / NOAA	1 km	8 vrk	1981–2012	Qu ym. 2014
CLARA-A1	NOAA	25 km	1 vrk	1982–2009	Riihelä ym. 2013
VEGETATION	SPOT	1 km	10 vrk	1999–2012	Barnsley ym. 2000

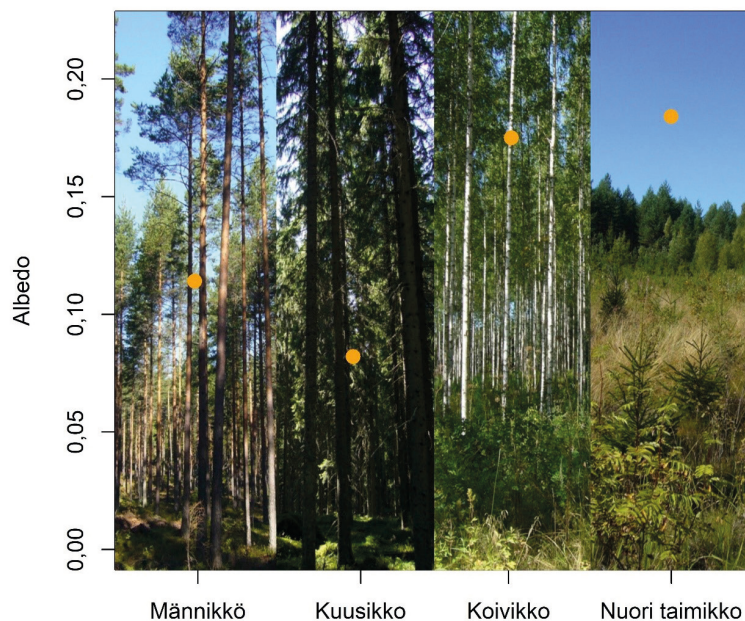
Kolmannen mahdollisuuden metsän albedon arvioimiseen tarjoavat metsän fysikaaliset heijastusmallit. Heijastusmallit simuloivat metsän albedon puustotietojen perusteella. Lisäksi tarvitaan tietoja puulajien lehtien tai neulasten (esim. Hovi ym. 2017b) ja pohja- ja kenttäkerroksen kasvillisuuden (esim. Rautiainen ym. 2011a) spektrisistä ominaisuuksista, mieluiten eri vuodenaikoina. Simuloinneissa voidaan olettaa eri vuorokauden- ja vuodenaikojä vaihtamalla auringonkulmaa. Huomattavaa on se, että heijastusmallit tuottavat albedon erikseen jokaiselle aallonpituudelle (eli ns. spektrisen albedon), joka täytyy vielä muuntaa leveäkaistaiseksi albedoksi käyttämällä hyväksi tietoja saapuvan auringonsäteilyn ja ilmakehän ominaisuuksista. Heijastusmalleja on monenlaisia: osa vaatii hyvinkin yksityiskohtaista tietoa metsän rakenteesta (esim. FRT-malli, Kuusk ja Nilson 2000) kun taas toiset mallit hyödyntävät lähinnä tietoa metsän lehtialaindeksistä-simuloidakseen sen albedon (esim. PARAS-malli, Stenberg ym. 2013). FRT-malli oli ensimmäinen, jota käytettiin boreaalisen metsän rakenteen ja albedon välisten riippuvuuksien tarkasteluun (Rautiainen ym. 2011b).

5 Miten metsän rakenne vaikuttaa albedoon?

Metsän rakenne vaikuttaa albedoon metsän eri komponenttien heijastusominaisuuksien sekä niiden tilajakauman ja orientaation kautta. Metsän eri komponentteihin voidaan laskea lehdet ja neulaset, rungot ja oksat sekä metsänpohja (aluskasvillisuus tai maa). Lehtipuiden lehtien albedo on korkeampi kuin havupuiden neulasten, erityisesti lähi- ja lyhytaaltoisen infrapunaa alueella (esim. Lukeš ym. 2013b; Hovi ym. 2017b). Vastaavasti lehtimetsien albedon on havaittu olevan korkeampi kuin havumetsien albedon (esim. Betts ja Ball 1997; Kuusinen ym. 2014) (Kuva 2). Tähän vaikuttaa lehtien albedon lisäksi metsän komponenttien tilajakauma: Rautiainen ja Stenberg (2005) näyttivät, että neulasten ryhmittäminen versoihin lisää säteilyn sitoutumista latvustoon lähi-infrapuna-alueella, jolloin havumetsän heijastus laskee verrattuna lehtimetsään, kun ”tehokkaan lehtialaindeksin” arvo on sama. Myös latvusmuodolla on merkittävä vaikutus metsästä heijastuneeseen säteilyyn (Rautiainen ym. 2004). Oksien heijastus (albedo) on yleensä matalampi kuin lehtien (Williams 1991), minkä takia lehtipuumetsien albedo lähestyy havupuuston albedoa lehdettömään aikaan keväällä ja syksyllä (Betts ja Ball 1997; Hovi ym. 2017a).

Metsänpohja vaikuttaa albedoon sitä enemmän, mitä harvempi metsä on (eli mitä enemmän metsänpohjaa näkyy ylhäältä päin) ja mitä enemmän metsänpohjan albedo eroaa latvuston albedosta. Esimerkiksi Hovi ym. (2016) havaitsivat, että metsänpohjan osuus koko metsän albedosta vaihteli välillä 4–53 %. Korkeimmat osuudet havaittiin korkeilla aurinkokulmilla ja harvoissa metsissä, ja osuudet laskivat kaikilla tutkituilla puulajeilla selvästi aurinkokulman madaltuessa. Boreaalissa metsissä metsänpohja on yleensä kasvillisuuden peitossa. Tietoa eri metsätyyppien pohjakasvillisuuden albedoista tai heijastusspektreistä on vähän (esim. Peltoniemi ym. 2005; Nikopensius ym. 2015), mutta Hovi ym. (2017a) raportoivat jonkin verran korkeampia metsänpohjan kasvukauden aikaisia lähi-infrapuna-alueen albedoita ja kokonaisalbedoita lehtomaisella ja tuoreella kankaalla verrattuna karumpiin kasvupaikkatyyppeihin.

Kasvava lehti- tai neulasbiomassa sitoo yhä enemmän auringonsäteilyä ja vähentää latvuksen aukkoisuutta eli metsänpohjan näkyvyyttä. Teoriassa metsän albedo laskee metsän latvusbiomassan, lehtialaindeksin, runkotilavuuden tai latvuspeittävyuden kasvaessa. Tällainen yhteys onkin havaittu havupuilla useissa mallinnukseen perustuvissa tutkimuksissa (Ni ja Woodcock 2000; Lukeš ym. 2013a; Stenberg ym. 2013; Hovi ym. 2016), mutta myös satelliittiaineistoihin perustuvissa tutkimuksissa, erityisesti talviaikaan (Bernier ym. 2011; Loranty ym. 2014; Lukeš ym. 2014; Hovi ym. 2019) ja nuorissa metsissä (Kuusinen ym. 2016). Havupuiden taimikoissa albedoa nostavat pienen havupuiden neulasalan lisäksi suuri lehtipuiden osuus ja aluskasvillisuuden heinävaltaisuus.



Kuva 2. Keskimääräiset Etelä-Suomessa mitatut kesäaikaiset sinisen taivaan albedot yhdessä varttuneen kasvatusmetsikön männikössä, kuusikossa, koivikossa ja pienessä kuusentaimikossa (Kuusinen ym. 2014). Kuvan metsiköt eivät liity mittauksiin.

Mäntymetsien albedo on keskimäärin kuusimetsiä korkeampi (Kuva 2), mikä selittynee juuri mäntymetsien keskimäärin kuusimetsiä pienemmällä lehtialaindeksillä sekä (todennäköisesti vähemmässä määrin) mahdollisilla neulasten albedojen eroilla. Lehtipuustoissa lehtien korkea albedo ja latvuksen havupuita ”yksinkertaisempi” rakenne aiheuttavat sen, että kasvava latvusbiomassa ei johda lähi-infrapuna-alueen heijastuksen pienenemiseen. Lehtipuiden kesäajan albedon onkin havaittu pysyvän lähes muuttumattomana tai muuttuvan vähemmän kuin havupuuston albedo latvusbiomassan, lehtialaindeksin, runkotilavuuden tai latvuspeittävyuden funktiona (Lukeš ym. 2013a; Hovi ym. 2016; Kuusinen ym. 2016; Bright ym. 2019).

Koska harvennukset vaikuttavat latvusbiomassan määrään, voisi olettaa havumetsän kasvustiheyden vaikuttavan albedoon. Tätä ei ole kuitenkaan havaittu käytännön mittauksissa: Kuusinen ym. (2014) mittasivat siirrettävässä mastossa olevilla pyranometreillä yhdeksän yhden puulajin metsikön kesäaikaista albedoa kolmena kesänä Etelä-Suomessa. He eivät havainneet eroa kahden varttuneen kuusikon keskimääräisissä albedoissa (0,082 ja 0,080), vaikka niiden latvuston ominaisuudet erosivat toisistaan selvästi (lehtialaindeksi 7,3 ja 3,8, latvuspeittävyys 0,70 ja 0,41), ja aluskasvillisuuden albedot olivat yhtä suuret. Samaten varttuneen kasvatusmetsikön männikön albedon ei havaittu muuttuvan voimakkaan harvennuksen seurauksena (0,115 ja 0,112) tai olevan erilainen kuin erittäin tiheässä nuoren kasvatusmetsikön männikössä (0,114), jossa tosin aluskasvillisuuden albedo oli korkeampi kuin harvennettavassa metsikössä. Kyseiset tulokset saattavat aiheutua siitä, että albedon vaste latvusbiomassaan tai lehtialaindeksiin on asymptootisesti vähenevä (esim. Lukeš ym. 2013a) eli ”keskimääräisen” ja ”korkean” lehtialaindeksin metsien albedoissa on vain pieni ero, joka saattaa kenttämittauksissa peittyä esimerkiksi metsänpohjan kasvillisuuden vaihtelusta aiheutuviin eroihin. Mallinnukseen perustuvassa tutkimuksessa, jossa malli oli parametrisoitu sekä Suomesta että Alaskasta tehdyillä mittauksilla, Hovi ym. (2016) havaitsivat että pituudeltaan yli 10 m puustoissa pohjapinta-ala ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$) vaikutti havumetsän albedoon, mutta selkeästi vähemmän kuin havumetsän muuttuminen lehtipuuvaltaiseksi. Pohjapinta-alan pitäisi vart-

tuneissa metsissä olla todella alhainen (alle $10 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$), jotta albedo kasvaisi merkittävästi ja olisi lähellä lehtipuumetsien albedoa. On selvää, että pohjapinta-alan pitäminen näin alhaisena johtaa, ehkä aivan pohjoisimpia ja karuimpia alueita lukuun ottamatta, tuotoksen vähenemiseen. Kuusisen ym. (2014) mittauksissa nuoren kuusikon sekä karulla kankaalla kasvaneen varttuneen taimikon männikön albedot (0,114 ja 0,129) olivat selvästi suuremmat kuin varttuneempien saman puulajin metsiköiden. Suurimmat albedot mitattiin koivikossa (0,175) ja pienessä kuusentaimikossa (0,184).

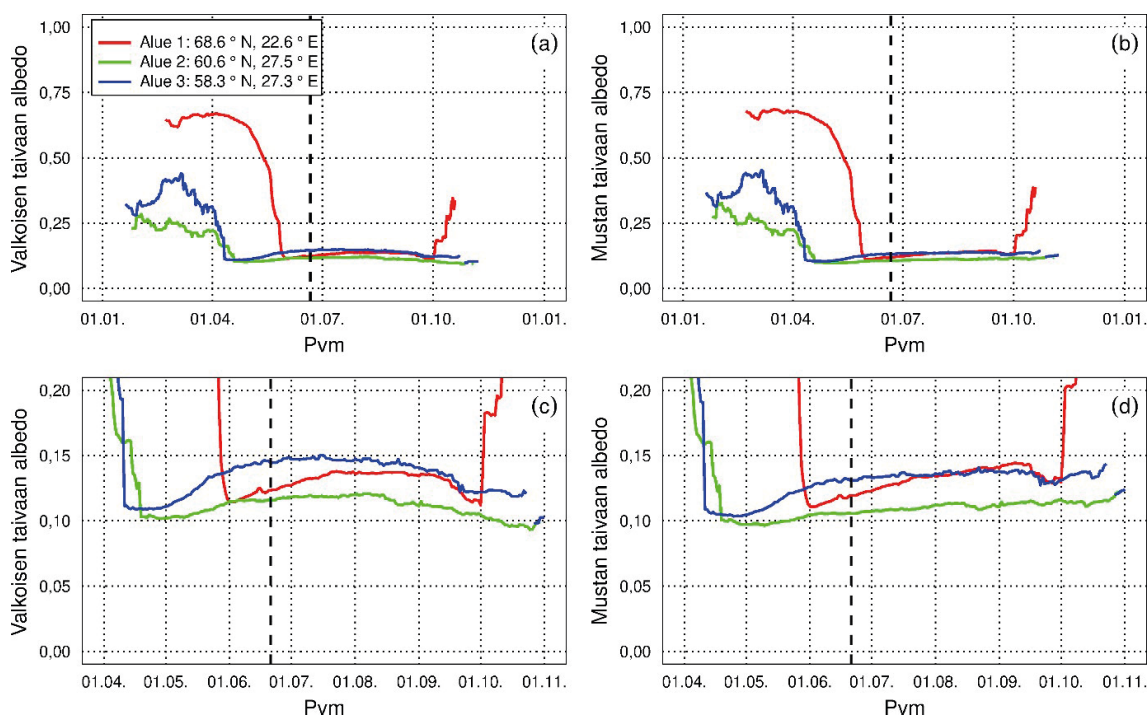
6 Lumen vaikutus metsän albedoon

Lumen albedo vaihtelee lumen kosteuden, iän, puhtauden, lumipeitteen paksuuden sekä säteilyn laadun mukaan. Napa-alueilla lumen albedon on havaittu vaihtelevan välillä 0,6–0,9 ollen matalimmillaan lumen sulaessa (Warren 1982). Lumipeitteen on avoimella ruohikolla havaittu nostavan albedoa lähes 60 %, kun taas metsässä maanpinnan lumipeitteen vaikutus on latvuston takia pienempi, 2–10 % puulajista riippuen (Betts ja Ball 1997). Betts ja Ball (1997) raportoivat lumipeitteisen haavikon albedoksi 0,214, männikön 0,15 ja kuusivaltaisen sekametsikön 0,108 (vrt. 0,156, 0,086 ja 0,081 kesällä). Metsän albedoon vaikuttavat lumipeitteisenä aikana lumen ominaisuuksien ja puulajin lisäksi puuston tiheys ja säteilyn ominaisuudet, kuten pilvisuus ja auringon korkeuskulma. Harva puusto päästää enemmän säteilyä maanpinnalle ja taas takaisin taivaalle, ja havumetsän tiheyden onkin havaittu korreloivan negatiivisesti albedon kanssa lumipeitteisenä aikana (Manninen ym. 2012; Lukeš ym. 2014; Webster ja Jonas 2018). Samasta syystä kasvavan lehtipuiden osuuden on havaittu nostavan metsän albedoa lumisena aikana (Kuusinen ym. 2013). Metsän, kuten monien muidenkin pintojen, albedo tavallisesti kasvaa auringon laskiessa kirkaalla säällä. Varsinkin matalammilla leveysasteilla voi albedo kuitenkin kasvaa keskipäivällä auringon suoran säteilyn tavoittaessa lumisen maanpinnan (Ni ja Woodcock 2000).

Lumen kertyminen puiden latvuksiin muuttaa edellä mainittuja tuloksia hieman. Pohjoisilla alueilla puihin kertyvä tykkylumi voi nostaa kuusimetsän albedon korkeammaksi kuin lehtimetsän albedon (Kuusinen ym. 2013). Havumetsän latvuston lumipeite yleisesti ottaen kasvattaa metsän albedoa (Stähli ym. 2009; Kuusinen ym. 2012; Webster ja Jonas 2018), mutta albedo vaihtelee voimakkaasti lumen ominaisuuksista ja määrästä, valaistusolosuhteista sekä metsän rakenteesta riippuen. Stählin ym. (2009) tutkimuksessa sveitsiläisen kuusikon albedo nousi 0,073–0,094:stä 0,096–0,242:een, kun lunta kertyi maan lisäksi puiden latvuksiin. Webster ja Jonas (2018) havaitsivat, että sveitsiläisen kuusimetsän albedo oli tiheän metsän yllä 0,15–0,2 yksikköä korkeampi (noin 0,3), kun puiden latvuksiin oli pidäntynyt runsaasti lunta verrattuna tilanteeseen, jossa vain maa oli lumen peitossa. Kuusinen ym. (2012) huomasivat, että pieni määrä lunta eteläsuomalaisen mäntymetsän latvustossa maanpinnan lisäksi ei muuttanut metsän albedoa juuri ollenkaan, kun taas suuri määrä noin kaksinkertaisti metsän albedon. Kyseisessä tutkimuksessa lunta esiintyi kolmen tutkimusvuoden aikana latvustossa huomattavasti kuitenkin ainoastaan keskitalvella, jolloin auringonsäteily oli heikkoa ja albedon vaikutus metsän vuotuiseseen energiataseeseen pieni. Kevään edetessä lumi putoaa tai haihtuu latvuksista nopeasti voimistuvan auringonsäteilyn ja kasvavan lämpötilan vaikutuksesta. Ilmastomallinnukseen käytettävien albedomallien teossa onkin viime vuosina havahduttu latvustoon pidäntyneen lumen vaikutukseen: useita ikivihreissä havumetsissä sijaitsevia tornimittauspaikkoja hyödyntäneessä tutkimuksessaan Bartlett ja Versegby (2015) ehdottivat lunta pidättäneen latvuston albedon lähtöarvoiksi 0,27 näkyvällä ja 0,38 lähi-infrapuna-alueen aallonpituusalueella. Ilmastomallien merkittävänä virhelähteenä lumisena aikana boreaalisisissa metsissä on myös pidetty metsän rakennetta kuvaavien tunnuslukujen ja sitä myötä albedon virhettä (Wang ym. 2016).

7 Metsän albedon vuodenaikaisvaihtelut

Lumen suuresta vaikutuksesta seuraa, että lumipeitteen muutokset ovat suurin metsän albedon vuodenaikaisvaihtelua aiheuttava tekijä. Lumipeitteeseen aikaan albedo on sitä korkeampi, mitä paksumpi ja puhtaampi lumipeite ja mitä harvempaa metsä on, joten albedo on tyypillisesti korkein pohjoisilla alueilla (Kuva 3A–B). Keväällä metsän albedo laskee nopeasti lumipeitteen sulaessa ja minimi saavutetaan lumen sulamisen jälkeen ennen lehtien puhkeamista (Kuva 3C–D). Lumettoman ajan albedon vaihtelusta ja sen yhteydestä metsän rakenteeseen saadaan selkein kuva tarkastelemalla valkoisen taivaan albedoa, koska se ei riipu auringon korkeuskulmasta. Lumettoman ajan albedo noudattelee lehtipuuston ja metsänpohjan kasvillisuuden kehitystä, eli albedo kasvaa keväällä, saavuttaa huippunsa keskikesän aikoihin, ja vähenee jälleen kohti syksyä (Kuva 3C–D). Albedon ero keskikesän ja kasvukauden alun tai lopun välillä kasvaa lehtipuusouden kasvaessa. Havupuiden neulasten albedot ovat lähes muuttumattomat kasvukauden yli ja havumetsän latvuston aukkoisuuden (lehtialaindeksi) vaihtelutkin ovat kohtalaisen pieniä, joten puhtaan havumetsän albedo on lähes muuttumaton kasvukauden yli (Betts ja Ball 1997; Kuusinen ym. 2012). Havumetsävaltaisilla alueilla satelliittikuvilta havaittava albedon kasvukauden aikainen vaihtelu (Kuva 3C–D) aiheutuneekin suurimmaksi osaksi metsänpohjan ja taimikoiden pintakasvillisuuden albedojen muutoksista. Mustan taivaan albedo poikkeaa edellä kuvatusta hieman, koska auringon päivittäiset maksimikorkeuskulmat kasvavat keväältä keskikesää kohti ja vähenevät jälleen kohti syksyä. Mustan taivaan albedo pienenee auringon korkeuskulman kasvaessa, joten siinä ei havaita



Kuva 3. Mustan ja valkoisen taivaan albedon vuodenaikaisvaihtelu kolmessa erilaisessa borealisessa metsässä: tunturikoivuvaltainen alue Pohjois-Lapissa (Alue 1), havupuuvaltainen alue Kaakkois-Suomessa (Alue 2) ja lehtipuuvaltainen alue Etelä-Virossa (Alue 3) (Hovi ym. 2019). Päivittäiset albedot on laskettu keskiarvoina MODIS-satelliittikuvilta lasketuista keskipäivän albedoista (MCD43A3-albedotuote, 0,5 km × 0,5 km pikselikoko) seitsemän vuoden ajalta niille päiville, joina auringon korkeuskulma ylittää 20 astetta. Vain pikselit, joissa metsän osuus maapinta-alasta oli yli 95 % (154–888 pikseliä eli 33–190 km² per alue), otettiin mukaan laskentaan. Alemman rivin kuvat ovat muuten samat kuin ylemmällä rivillä, mutta asteikkoa on rajattu, jotta lumettoman ajan albedon vaihtelu erottuu paremmin. Musta pystyviiva osoittaa kesäpäivänseisauksen, eli aurinko on silloin korkeimmillaan.

yhtä selkeää huippua keskikesällä kuin valkoisen taivaan albedon tapauksessa (Kuva 3C–D). Kevätaikaan aurinkokulman vaikutukset peittyvät helposti lumen vaikutukseen, koska lumipeitteen vaikutus on paljon aurinkokulman vaikutusta suurempi.

Tärkeä johtopäätös vuodenaikaisvaihteluista on, että metsän albedo ei ole vakio, vaan muuttuu ajan myötä. Tästä seuraa, että esimerkiksi erilaisten metsänkäsittelyvaihtoehtojen ilmasto-vaikutuksia arvioitaessa vuodenaikaisvaihteluiden huomiotta jättäminen voi johtaa virheellisiin päätelmiin. Hieman parempi käsitys saadaan laskemalla keskimääräinen albedo koko vuoden tai jopa koko kiertoajan yli, ja näitä keskimääräisiä albedoita voidaan sitten vertailla eri metsänkäsittelyvaihtoehtojen välillä. Albedo tietyllä ajanjaksolle (esimerkiksi kuukausi tai vuosi) saadaan laskemalla yhteen koko ajanjakson aikana maanpinnalta heijastunut auringon säteilyenergia ja jakamalla tämä maanpinnalle saapuneen säteilyenergian summalla. Toisin sanoen keskimääräinen albedo on hetkittäisten (päivä-, tunti-, tai jopa minuutikohtaisten) albedojen auringon irradianssilla painotettu keskiarvo. Teoriassa mitä pienempää aika-askelta laskennassa käytetään sitä tarkempaan tulokseen päästään. Auringosta maanpinnalle saapuva säteily vaihtelee huomattavasti vuodenaikojen välillä. Ääriesimerkki tästä ovat napapiirin pohjoispuoliset alueet, jossa aurinko ei keskitalvella nouse lainkaan ja keskitalven albedo ei siten juurikaan vaikuta vuotuisen energiataseeseen.

Hovi ym. (2019) tutkivat, miten päivittäisistä MODIS-satelliittien tuottamista albedoista lasketut keskimääräiset vuosittaiset albedot riippuvat metsän rakenteesta. Tutkimuksessa oli mukana 22 aluetta Suomesta, Virossa, Ruotsista ja Venäjältä (57.6°–68.6° N). Tutkimuksessa havaittiin, että metsän keskimääräinen vuosittainen albedo kasvaa huomattavasti etelästä pohjoiseen päin ollen matalimmillaan 0,105 ja korkeimmillaan 0,284. Pohjoisessa lumipeitteinen kausi on pitkä ja lunta on maassa vielä loppukeväästäkin (huhti-toukokuussa), jolloin auringonsäteilyä tulee jo maanpinnalle huomattavan paljon vaikuttaen siten merkittävästi vuoden keskimääräiseen albedoon. Kun lumipeitteen vaikutus poistettiin, metsän keskimääräinen vuosittainen albedo oli lähes vakio riippumatta leveysasteesta. Toinen merkittävä havainto oli, että metsän latvuspeitto tai nuoren metsän (puuston pituus alle 5 m tai latvuspeitto alle 10 %) osuus vaikutti metsäalueen keskimääräiseen vuosittaiseen albedoon, ja siten myös maanpinnalta heijastuneen auringonsäteilyn absoluuttiseen määrään, sitä enemmän mitä pohjoisemmaksi mentiin. Tämä aiheutuu siitä, että tarkasteltujen muuttujien vaikutus albedoon on suurempi lumipeitteiseen kuin lumettomaan aikaan. Tulosten perusteella näyttää siltä, että jos ainoastaan albedo huomioitaisiin, metsän kasvattaminen harvana ja lyhyellä kiertoajalla olisi erityisen suotuisaa ilmaston kannalta pohjoisessa.

Hovin ym. (2019) tutkimuksessa ilmakehä jätettiin huomioimatta, joten tuloksia tulkittaessa pitää ottaa huomioon, että havaitut metsän rakenteesta aiheutuvat erot maanpinnalta vuosittain heijastuneessa auringonsäteilyssä eivät vaikuta maapallon energiataseeseen täysimääräisinä. Ilmakehä nimittäin absorboi osan maanpinnalta heijastuneesta auringonsäteilystä ja vaimentaa siten jonkin verran eroja avaruuteen heijastuneen auringonsäteilyn määrässä erilaisten metsien välillä. Heijastuneen säteilyn laskentaan voidaan yhdistää myös ilmakehämalli tai yksinkertaisimmillaan oletus ilmakehän keskimääräisestä läpäisevyydestä, jolloin voidaan laskea eri metsänkäsittelyvaihtoehtoilta säteilypakotteita (engl. radiative forcing). Säteilypakote kuvaa, kuinka paljon jokin toimi muuttaa maapallon energiatasetta, ja ilmaistaan yleensä watteina per neliometri (Myhre ym. 2013). Säteilypakote voidaan laskea myös esimerkiksi metsän sitomalle hiilelle, jolloin hiilensidonnan ja albedon vaikutuksia voidaan vertailla (esim. Bernier ym. 2011). Käytännössä metsän albedon muutoksen aiheuttaman säteilypakotteen laskemiseksi pitää laskea, kuinka paljon vuoden aikana maanpinnalta ja ilmakehästä avaruuteen heijastunut säteilyenergia muuttuu metsän albedon muutoksen seurauksena. Säteilypakotekin on kuitenkin eri tekijöiden ilmastovaikutusten vertailua varten kehitetty yksinkertaistus: oikeasti ilmasto on dynaaminen systeemi ja energiataseen muutosten vaikutusta esimerkiksi ilmakehän lämpötiloihin ei ole yksinkertaista mallintaa (Myhre ym. 2013). Lisäksi, kuten luvussa 3 jo kerrottiin, albedon muutokset ovat kytköksissä esimerkiksi

haihduntaan ja sitä kautta pilvien muodostumiseen. Olisikin tärkeää tuottaa kaukokartoituksen, fyysikaalisen mallinnuksen ja maastomittausten avulla mahdollisimman kattavasti albedon riippuvuuksia metsän rakenteesta eri vuodenaikoina ja eri maantieteellisillä alueilla. Näitä voitaisiin sitten yhdistää ilmastomalleihin, jolloin voitaisiin kokonaisvaltaisesti arvioida metsien käsittelyn ja luonnollisten muutosten vaikutuksia ilmastoon. Albedon käyttöä ilmastomalleissa käydään tarkemmin läpi luvussa 9.

8 Suomen metsien albedo viime vuosikymmeninä

Optisista satelliittikuvista muodostettuja aikasarjoja albedon arvioimiseen on tällä hetkellä tarjolla 1980-luvun alusta alkaen. Viimeisten noin 40 vuoden aikana Suomen metsien puuston tilavuus on kasvanut lähes 50 %, mutta metsäpinta-ala on pysynyt lähes samana (Vaahtera ym. 2018). Näin ollen voisi olettaa, että myös albedossa näkyisi huomattavia muutoksia, koska järeämmät ja tiheimmät metsät sitovat enemmän säteilyä. Valtakunnallisella tasolla on kuitenkin havaittavissa vain pieniä muutoksia: vuosien 1982 ja 2008 välillä metsien kesäajan albedo nousi vain aavistuksen (Lukeš ym. 2016). Korkeimmillaan Suomen metsien kesäajan albedo valtakunnan tasolla tarkasteluna oli 1990-luvun alussa (Lukeš ym. 2016). Myös Suomen metsien lumipeitteisen ajan albedon pitkäaikaismuutoksia on selvitetty hyödyntäen albedoaineistoa vuosilta 1982–2016. Tarkemman maantieteellisen tarkastelun tuloksena selvisi, että Pohjois-Pohjanmaalla, Pohjois-Karjalassa, Kainuussa ja Etelä-Lapissa on metsän albedo juuri ennen lumien sulamisen ajankohtaa laskenut hieman vuoden 1982 jälkeen (Manninen ym. 2019) eli pohjoiset metsämme ovat muuttuneet tummemmiksi talviaikaan. Selitykseksi tarjottiin puuston runkotilavuuden kasvua erityisesti näillä alueilla. Näiden kahden tutkimuksen perusteella ei ole yksiselitteistä vastausta sille, miten (ja miksi) albedo on muuttunut vuosikymmenten aikana. Myös tiedot keskimääräisestä vuosittaisesta albedosta (yksittäisten ajankohtien sijaan) auttaisivat vertaamaan albedoajasarjoja ja metsävaratietojen kehitystä. Tulokset kuitenkin viittaavat siihen, että puuston runkotilavuuden (tai biomasan) merkittävä kasvu viime vuosikymmenten aikana ei ole johtanut suuriin muutoksiin albedossa valtakunnallisella tasolla. Paikallisia muutoksia albedossa voi kuitenkin olla. Todennäköisesti suurempia muutoksia albedossa on havaittavissa, jos boreaaliset metsät muuttuvat tulevaisuudessa merkittävästi lehtipuuvaltaisimmiksi ja jos lumipeitteisen ajan kesto lyhenee.

9 Metsän albedo ilmastomalleissa

Globaalien ilmastomallien, kuten esimerkiksi ”The Community Earth System Model” (CESM, 2020), avulla voidaan huomioida metsän albedon vaikutus ilmastoon. Ilmastomallit rakentuvat lukuisten osamallien kokonaisuuksista. Englanniksi maanpinnan ja biosfäärin rajalla toimivien osamallien kokonaisuuksia kutsutaan termillä ’land surface model’ (LSM), jolle ei ole täsmällistä suomenkielistä käännöstä. LSM-termin suomenkielinen vastine voisi olla suora käännös englanninkielisestä määritelmästä, jolloin puhuttaisiin ’maanpinnan ja ilmakehän malleista’. Vaihtoehtoisesti voisimme kutsua näitä malleja esimerkiksi ’biosfäärimalleiksi’ tai ’elonkehämalleiksi’, sillä biosfäärin määritelmä Vladimir Ivanovich Vernadskyn (1863–1945) mukaan (Lapo 2001) – ”Biosfääri (kr. βίος, bios, elämä ja σφαίρα, sfaira, kehä) eli elonkehä on maapallon pinnan osa, jolla elämä on mahdollista.” – heijastelee englanninkielistä vastinettaan. Esimerkiksi CESM-ilmastomallin LSM-osamallikokonaisuuden nimi on ”Community Land surface Model” (CLM), ja se on kehitetty simuloimaan erilaisia biogeofysikaalisia, biogeokemiallisia, hydrologisia, ja väestönkasvun kehitykseen liittyviä prosesseja. Tässä artikkelissa käytämme termiä ’biosfääri-

malli' kuvaamaan LSM-osamallikokonaisuuksia (kuten CLM:ää). Koska monet biosfäärimalleista toimivat monimutkaisten takaisinkytkentöjen kautta, on mallien kehitystyö haastavaa. Onkin huomionarvoista, että ilmastomallisimulaatiot eivät suinkaan rajoitu vain tulevien muutosten simulointiin, vaan malleja ajetaan myös 'takaperin', jotta ilmastomallien ennusteita voidaan verrata jo havaittuihin muutoksiin. Näiden vertailujen pohjalta voidaan arvioida mallien ennusteiden paikansapitävyyttä ja kalibroida mallin parametreja, jotta ennusteet ja havaitut muutokset vastaisivat paremmin toisiaan.

Nykyisissä biosfäärimalleissa käytetään usein pohjana satelliittimittauksiin perustuvia aineistoja, joilla maanpinta voidaan kuvata maanpeiteluokkien avulla. Satelliittimittauksista tuotettavat hila-aineistot luokitetaan maanpeitteen mukaan pääluokkiin, kuten 'jäätiköihin', 'järviin', 'kosteikkoihin', 'rakennettuun ympäristöön' ja 'kasvillisuuteen'. Pääluokat voidaan edelleen jakaa alaluokkiin. Esimerkiksi pääluokka 'kasvillisuus' voidaan edelleen jakaa alaluokkiin (kuten 'metsä' ja 'pelto'), ja alaluokka 'metsä' voidaan puolestaan edelleen jakaa esimerkiksi 'havu'- ja 'lehtimetsiin'. Globaaleissa ilmasto- ja biosfäärimalleissa käytettävien maanpeitekarttojen spatiaalinen resoluutio on tyypillisesti 0,05 astetta (joka vastaa noin $\sim 5,6 \text{ km} \times 5,6 \text{ km}$ aluetta päiväntasaajalla). Tätä karttahiraa kutsutaan englanniksi termillä "Climate Modeling Grid", jonka voisi suomentaa esimerkiksi ilmastomallinnushilaksi. On huomionarvoista, että karttahiraruuden (eli pikselin) koon kasvaessa, todennäköisyys, että hilaruutu sisältää useampia maanpeiteluokkia kasvaa eli hilaruutu koostuu maanpeiteluokkien mosaiikista. Nykyisin ovat yleistymässä maanpeitekartat, joissa hilaruutu voi kuulua osittain useampaan pää- ja alaluokkaan. Alueellisissa mallinnustehtävissä, kuten esimerkiksi pohjoismaista havumetsää tutkittaessa, voidaan käyttää hienomman resoluution luokituksia. Esimerkki tällaisesta ovat Euroopan avaruusjärjestön "Climate Change Initiative" (CCI) maanpeitekartat (Poulter ym. 2015), joiden spatiaalinen resoluutio on 0,0028 astetta (karttahiraruuden koko $\sim 0.3 \text{ km} \times 0.3 \text{ km}$ päiväntasaajalla) ja jotka kuvaavat maanpintaa käyttäen 22 eri maanpeiteluokkaa. Toistaiseksi CCI:n maanpeitekartoissa on olemassa luokitus, joilla tiheät ja avoimet havu-, lehti- ja sekametsän voidaan erottaa toisistaan. Yleensä boreaaliset metsät on kuitenkin luokiteltu vain havu-, lehti- tai sekametsiksi. Tämä tarkoittaa sitä, että tarkempia riippuvuuksia metsän rakenteen ja albedon välillä ei voida huomioida nykyisen luokituksen avulla.

Biosfäärimalleissa jokaisen maanpeiteluokan eri ominaisuuksille on määritelty kiinteät parametrit, ja esimerkiksi maanpinnan albedo lasketaan eri maanpeiteluokkien albedoarvojen pinta-aloilla painotettuna keskiarvona. Edellä mainittujen vain havu- ja lehtimetsät erottelevien karttatuotteiden pohjalta ei kuitenkaan pysty kuvaamaan metsien rakennevaihtelua tai metsänhoitotoimien vaikutusta albedoon. Viime vuosina alueellisten biosfäärimalleiden haasteena onkin ollut kehittää olemassa olevia maanpeiteluokituksia ja karttatuotteita suuntaan, joka mahdollistaa metsän rakenteen, puulajin ja tiheyden kuvaamisen. Tätä luokittamiseen liittyvää ongelmaa on yritetty ratkaista mm. kehittämällä esimerkiksi pohjoismainen metsäluokitus (Majasalmi 2017; Majasalmi ym. 2018) perustuen metsien inventointiaineistoihin ja monilähdeinventointien karttatuotteisiin (Mäkisara ym. 2019). Luokitetun karttatuotteen avulla on mahdollista irrottaa eri metsäluokkien albedoarvot satelliittimittauksiin perustuvilta MODIS-albedotuotteilta (Bright ym. 2018). Näiden metsäluokkakohtaisten albedoarvojen kautta tulevaisuudessa tapahtuvat muutokset metsän rakenteessa ja puulajisuhteissa saadaan huomioitua ilmastoennusteiden simuloinneissa.

Boreaalaisella alueella lumella (tai sen puuttumisella) on merkittävä vaikutus albedoon. Biosfäärimalleissa tietyn alueen albedo voidaan laskea esimerkiksi käyttäen täydellistä säteilynsiirtomallia (engl. radiative transfer model). Vaihtoehtoisesti alueen albedo voidaan arvioida olettamalla kasvillisuustyyppittaiset keskimääräiset albedoarvot (esim. Majasalmi ja Bright 2019), joita painotetaan mahdollisella latvustoon sitoutuneen lumen osuudella, ja lopuksi laskemalla painotettu keskiarvo latvuston ja maan albedoarvoista niiden peittämien pinta-alojen suhteen (Qu ja Hall 2007). Lumen albedo voidaan olettaa kasvillisuustyyppistä riippuvaksi tai riippumattomaksi.

Borealisella alueella ilmasto- ja biosfäärimallien suurimpien virhelähteiden voidaan olettaa aiheuttavan epätäydellisen maanpeiteluokituksen ja parametrisointien (Wang ym. 2016; Bright ym. 2018) lisäksi myös lumen albedon määrän ja ominaisuuksien ajallisesta ja paikallisesta vaihtelusta, sekä parametreista, jotka määrittelevät lumisen latvuksen heijastusominaisuuksia. Näitä parametrejä ovat esimerkiksi lumen pysyvyys latvuksessa ja lumen ikääntymisen mukanaan tuomat muutokset lumen heijastusominaisuuksiin.

Vaikka on selvää, että erilaisten maanpeiteluokkien määrän lisääminen ja korkeamman spatiaalisen resoluution käyttö maanpinnan luokituksessa parantaisivat ilmastoennusteiden todennukaisuutta, asettaa tietokoneiden laskentateho vielä tällä hetkellä rajoitteita niin spatiaaliselle resoluutiolle kuin maanpeiteluokkien määrällekin, jotka voidaan huomioida maailmanlaajuisissa simulaatioissa. Alueellisissa analyyseissä, joissa keskitytään esimerkiksi metsänhoidollisesti ja rakenteellisesti verrattain yhtenäiseen Fennoskandiaan, voidaan kuitenkin sallia maanpeiteluokitus, jolla on verrattain korkea spatiaalinen resoluutio ja suurempi määrää luokkia kuvaamassa metsän rakenteessa ja puulajisuhteessa ajan ja metsänhoitotoimien vaikutuksesta tapahtuvia muutoksia. Koska biosfäärimallien sallima maanpeiteluokkien määrä vaihtelee (esim. 5–16 luokkaa), ei ole yksiselitteisesti yhtä ja oikeaa tapaa metsien rakennevaihtelun ja ominaisuuksien kuvaamiseen.

Tulevaisuudessa ilmastomallien hyödyntämien maanpeitekarttojen ja niihin liittyvien kasvillisuutta kuvaavien parametrien voidaan olettaa kehittyvän kohti ns. jatkuvia kasvifysiologisia (engl. 'trait-based') ominaisuusmuuttujia (Fisher ym. 2018), joita ovat esimerkiksi lehtien lehtivihreäpitoisuus tai ominaispinta-ala (engl. specific leaf area). Biosfäärimallien kehitystyö on kuitenkin vaikeaa mm. monilla maantieteellisillä alueilla maastoaineistojen vähäisyyden tai epätäydellisyyden vuoksi. Lisäksi päänvaivaa tuottaa monimutkaisten ekologisten vuorovaikutussuhteiden kuvaus.

10 Mitä ei vielä tiedetä boreaalisen metsän albedosta?

Metsien albedoon liittyvä tutkimus on ollut aktiivista viime vuosina. On kuitenkin useita kysymyksiä, joihin ei vielä osata vastata. Yksi keskeisimmistä rajoitteista on ollut se, että tähän asti saatavilla olleet satelliittikuviin perustuvat albedotuotteet ovat edustaneet karkeaa spatiaalista resoluutiota. Koska albedotuotteiden (esim. 1 km × 1 km) ja suomalaisen metsän tyypillisen kuviokoon (esim. 1 ha) spatiaalisen resoluution välillä on hyvin suuri, usein jopa satakertainen ero, ovat monet analyysit metsän rakenteen ja albedon välisistä suhteista vain suuntaa-antavia ja kuvaavat muutoksia karkealla tasolla. Kun korkeamman spatiaalisen resoluution albedotuotteet tulevat julkisesti saataville, voidaan tarkastella yksityiskohtaisia metsikkötason muutoksia ja metsänhoitotoimenpiteiden vaikutuksia albedoon. Tällainen tieto tukee myös paremmin albedon mahdollista huomioimista esimerkiksi metsänhoidon päätöksenteossa. Lumen merkittävän vaikutuksen ja boreaalisten metsien maantieteellisen vaihtelun takia olisi tärkeä tuottaa tietoa metsän rakenteen ja albedon vuodenaikaisvaihtelun yhteyksistä kattavasti erilaisille ilmastoalueille. Siihen asti, kunnes korkeamman resoluution albedotuotteita on laajasti saatavilla, tarjoavat heijastusmalleihin perustuvat simuloinnit ainoan vaihtoehdon metsikkötason albedoanalyyseihin laajoille maantieteellisille alueille. Heijastusmallien käyttöä rajoittavat kuitenkin osittain puutteelliset spektrikirjastot boreaalista (ja muistakin) metsistä. Spektrikirjastoja tarvitaan heijastusmalleissa kuvaamaan mm. puiden lehtien, runkojen ja aluskasvillisuuden optisia ominaisuuksia. Nykyiset spektrikirjastot sisältävät lähinnä keskikesän mittausaineistoja yleisimmistä puulajeista, joten esimerkiksi metsän albedon vuodenaikaisimuloinnit vaativat merkittäviä yksinkertaistuksia kasvillisuuden optisten ominaisuuksien muutoksista (jotka puolestaan kuvaavat biokemiallisia ja rakenteellisia muutoksia) kasvukauden aikana. Erityisesti Suomea koskeva avoin kysymys liit-

tyy suometsien käsittelyyn ja sen vaikutuksiin albedoon kehitykseen. Muutokset näiden alueiden pintakasvillisuudessa ja kosteudessa näkyvät myös muutoksina albedossa. Kaiken kaikkiaan soiden ja suometsien albedo on ollut erittäin vähän tutkittu aihe, eikä sitä ole myöskään tutkittu edes heijastusmallinnuksen kautta.

Metsien albedon vaihtelun selvittäminen tuottaa tietoa energiavirroista maan ja ilmakehän välillä sekä tarkennettuja lähtötietoja ilmastomallinnukseen. Siihen, pitäisikö albedon vaihtelu erityyppisten metsien välillä ottaa huomioon ilmastopolitiikassa tai metsänhoidon päätöksenteossa, ei pystytä vastaamaan, ennen kuin kaikki metsien ilmastoon vaikuttavat tekijät on pystytty arvioimaan samanaikaisesti. Tällaisia ovat hiilensidonnan ja albedon lisäksi muun muassa metsien energiavuot, muiden kasvihuonekaasujen kuin hiilidioksidin päästöt ja sidonta sekä metsien haihduttamat VOC-yhdisteet (engl. volatile organic compounds), jotka osallistuvat mm. pilviytiminä toimivien aerosolien muodostumiseen. Jos vain albedo huomioitaisiin, näyttäisi siltä, että metsät täytyisi ilmaston viilentämiseksi kasvattaa lehtipuuvaltaisina ja havumetsien kiertoaika pitää lyhyenä. Nämä tulokset voivat olla myös ristiriidassa metsistä saatavan taloudellisen tuoton tai muiden hyötyjen maksimoinnin kanssa. Vaikka albedoa ei metsänhoitoa ohjaavassa päätöksenteossa huomioitaisikaan, on albedon vaihtelun ymmärtäminen joka tapauksessa tärkeää, kun halutaan ymmärtää ja ennustaa maankäytön vaikutuksia paikalliseen ja laajemman alueen ilmastoon.

Kiitokset

Kiitämme työmme rahoittamisesta Suomen Akatemiaa (päättönumerot 286390 ja 323004) sekä Euroopan tutkimusneuvostoa (sopimusnumero 771049).

Kirjallisuus

- Anttila K. (2019). Seasonal snow surface roughness and albedo. Finnish Meteorological Institute Contributions 149. 77 s. <http://hdl.handle.net/10138/301140>.
- Arora V.K., Montenegro A. (2011). Small temperature benefits provided by realistic afforestation efforts. *Nature Geoscience* 4: 514–518. <https://doi.org/10.1038/ngeo1182>.
- Baldocchi D., Kelliher F.M., Black T.A., Jarvis P. (2000). Climate and vegetation controls on boreal zone energy exchange. *Global Change Biology* 6(S1): 69–83. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.06014.x>.
- Barnsley M., Quaife T., Hobson P., Shaw J., Lewis P., Disney M., Muller J., Strahler A., Barker-Schaaf C., Lucht W. (2000). Estimation of land-surface albedo and biophysical properties using SPOT-4 VGT and semi-empirical BRDF models. *Proceedings of International SPOT4 Vegetation Conference, Tukholma, Ruotsi*. <http://www.spot-vegetation.com/pages/vgtprep/vgt2000/barnsley.pdf>.
- Bartlett P.A., Verseghy D.L. (2015). Modified treatment of intercepted snow improves the simulated forest albedo in the Canadian Land Surface Scheme. *Hydrological Processes* 29(14): 3208–3226. <https://doi.org/10.1002/hyp.10431>.
- Bathiany S., Claussen M., Brovkin V., Raddatz T., Gayler V. (2010). Combined biogeophysical and biogeochemical effects of large-scale forest cover changes in the MPI earth system model. *Biogeosciences* 7(5): 1383–1399. <https://doi.org/10.5194/bg-7-1383-2010>.
- Bernier P.Y., Desjardins R.I., Karimi-Zindashty Y., Worth D., Beaudoin A., Luo Y., Wang S. (2011). Boreal lichen woodlands: a possible negative feedback to climate change in eastern North America. *Agricultural and Forest Meteorology* 151(4): 521–528. <https://doi.org/10.1016/j>

[agrformet.2010.12.013](#).

- Betts R.A. (2000). Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. *Nature* 408: 187–190. <https://doi.org/10.1038/35041545>.
- Betts A.K., Ball J.H. (1997). Albedo over the boreal forest. *Journal of Geophysical Research* 102(D24): 28901–28909. <https://doi.org/10.1029/96JD03876>.
- Bright R.M., Antón-Fernández C., Astrup R., Cherubini F., Kvalevåg M., Strømman A.H., Peters G.P. (2014). Climate change implications of shifting forest management strategy in a boreal forest ecosystem of Norway. *Global Change Biology* 20(2): 607–621. <https://doi.org/10.1111/gcb.12451>.
- Bright R.M., Eisner S., Lund M.T., Majasalmi T., Myhre G., Astrup R. (2018). Inferring surface albedo prediction error linked to forest structure at high latitudes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 123(10): 4910–4925. <https://doi.org/10.1029/2018JD028293>.
- Bright R.M., Astrup R. (2019). Combining MODIS and national land resource products to model land cover-dependent surface albedo for Norway. *Remote Sensing* 11(7) article 871. <https://doi.org/10.3390/rs11070871>.
- CESM. (2020). [Verkkodokumentti]. <http://www.cesm.ucar.edu/models/clm/>. [Viitattu 10.2.2020].
- Diner D., Martonchik J., Borel C., Gerstl S., Gordon H., Knyazikhin Y., Myneni R., Pinty B., Michel M. (2008). [Verkkodokumentti]. Multi-angle imaging spectro-radiometer level 2 surface retrieval algorithm theoretical basis. Jet Propulsion Laboratory, La Canada Flintridge, CA, USA. https://eosps.nasa.gov/sites/default/files/atbd/ATB_L2Surface43.pdf. [Viitattu 4.2.2020].
- Donohoe A., Battisti D.S. (2011). Atmospheric and surface contributions to planetary albedo. *Journal of Climate* 24: 4402–4418. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3946.1>.
- Fisher R.A., Koven C.D., Anderegg W.R., Christoffersen B.O., Dietze M.C., Farris C., Lichstein J.W. (2018). Vegetation demographics in Earth System Models: a review of progress and priorities. *Global Change Biology* 24(1): 35–54. <https://doi.org/10.1111/gcb.13910>.
- Hovi A., Liang J., Korhonen L., Kobayashi H., Rautiainen M. (2016). Quantifying the missing link between forest albedo and productivity in the boreal zone. *Biogeosciences* 13(21): 6015–6030. <https://doi.org/10.5194/bg-13-6015-2016>.
- Hovi A., Lindberg E., Lang M., Arumäe T., Peuhkurinen J., Sirparanta S., Pyankov S., Rautiainen M. (2019). Seasonal dynamics of albedo across European boreal forests: analysis of MODIS albedo and structural metrics from airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment* 224: 365–381. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.001>.
- Hovi A., Lukeš P., Rautiainen M. (2017a). Seasonality of albedo and FAPAR in a boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 247: 331–342. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.08.021>.
- Hovi A., Raitio P., Rautiainen M. (2017b). A spectral analysis of 25 boreal tree species. *Silva Fennica* 51(4) article 7753. <https://doi.org/10.14214/sf.7753>.
- Kuusinen N. (2014). Boreal forest albedo and its spatial and temporal variation. *Dissertationes Forestales* 179. 48 s. <https://doi.org/10.14214/df.179>.
- Kuusinen N., Kolari P., Levula J., Porcar-Castell A., Stenberg P., Berninger F. (2012). Seasonal variation in boreal pine forest albedo and effects of canopy snow on forest reflectance. *Agricultural and Forest Meteorology* 164: 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.05.009>.
- Kuusinen N., Lukes P., Stenberg P., Levula J., Nikinmaa E., Berninger F. (2014). Measured and modelled albedos of Finnish boreal forest stands of different species, structure and understory. *Ecological Modelling* 284: 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.04.007>.
- Kuusinen N., Stenberg P., Korhonen L., Rautiainen M., Tomppo E. (2016). Structural factors driving boreal forest albedo in Finland. *Remote Sensing of Environment* 175: 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.007>.

- doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.035.
- Kuusinen N., Tomppo E., Berninger F. (2013). Linear unmixing of MODIS albedo composites to infer subpixel land cover type albedos. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 23: 324–333. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.10.005>.
- Kuusik A., Nilson T. (2000). A directional multispectral forest reflectance model. *Remote Sensing of Environment* 72(2): 244–252. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00111-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00111-X).
- Lapo A.V. (2001). Vladimir I. Vernadsky (1863–1945), founder of the biosphere concept. *International Microbiology* 4(1): 47–49. <https://doi.org/10.1007/s101230100008>.
- Levy C., Burakowski E., Richardson A. (2018). Novel measurements of fine-scale albedo: using a commercial quadcopter to measure radiation fluxes. *Remote Sensing* 10(8) article 1303. <https://doi.org/10.3390/rs10081303>.
- Li Z., Erb A., Sun Q., Liu Y., Shuai Y., Wang Z., Boucher P., Schaaf C. (2018). Preliminary assessment of 20-m surface albedo retrievals from sentinel-2A surface reflectance and MODIS/VIIRS surface anisotropy measures. *Remote Sensing of Environment* 217: 352–365. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.025>.
- Lorant M.M., Berner L.T., Goetz S.J., Jin Y., Randerson J.T. (2014). Vegetation controls on northern high latitude snow-albedo feedback: Observations and CMIP5 model simulations. *Global Change Biology* 20(2): 594–606. <https://doi.org/10.1111/gcb.12391>.
- Lukeš P., Rautiainen M., Manninen T., Stenberg P., Möttus M. (2014). Geographical gradients in boreal forest albedo and structure in Finland. *Remote Sensing of Environment* 152: 526–535. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.06.023>.
- Lukeš P., Stenberg P., Rautiainen M. (2013a). Relationship between forest density and albedo in the boreal zone. *Ecological Modelling* 261–262: 74–79. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.04.009>.
- Lukeš P., Stenberg P., Rautiainen M., Möttus M., Vanhatalo K. (2013b). Optical properties of leaves and needles for boreal tree species in Europe. *Remote Sensing Letters* 4(7): 667–676. <http://dx.doi.org/10.1080/2150704X.2013.782112>.
- Lukeš P., Stenberg P., Möttus M., Manninen T., Rautiainen M. (2016) Multidecadal analysis of forest growth and albedo in boreal Finland. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 52: 296–305. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.07.001>.
- Majasalmi T. (2017). [Verkkodokumentti]. Enhanced LC-product for Fennoscandia. NIBIO. <https://doi.org/10.21350/c9j08bz3>. [Viitattu 11.02.2020].
- Majasalmi T., Bright R. (2019). Evaluation of leaf-level optical properties employed in land surface models. *Geoscientific Model Development* 12(9): 3923–3938. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3923-2019>.
- Majasalmi T., Eisner S., Astrup R., Fridman J., Bright R. (2018). An enhanced forest classification scheme for modeling vegetation-climate interactions based on national forest inventory data. *Biogeosciences* 15(2): 399–412. <https://doi.org/10.5194/bg-15-399-2018>.
- Manninen T., Aalto T., Markkanen T., Peltoniemi M., Böttcher K., Metsämäki S., Anttila K., Pirinen P., Leppänen A., Arslan A. (2019). Monitoring changes in forestry and seasonal snow using surface albedo during 1982–2016 as an indicator. *Biogeosciences* 16(2): 223–240. <https://doi.org/10.5194/bg-16-223-2019>.
- Manninen T., Korhonen L., Riihelä A., Lahtinen P., Stenberg P., Roujean J.-L., Hautecoeur O. (2012). Boreal forest albedo and LAI in SNORTEX 2008-2010. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. s. 3335–3338. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6350589>.
- Myhre G., Shindell D., Bréon F.-M., Collins W., Fuglestedt J., Huang J., Koch D., Lamarque J.-F., Lee D., Mendoza B., Nakajima T., Robock A., Stephens G., Takemura T., Zhang H. (2013).

- Anthropogenic and natural radiative forcing. Julkaisussa: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (toim.). *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. s. 659–740.
- Mäkisara K., Katila M., Peräsaari J. (2019). The Multi-Source National Forest Inventory of Finland – methods and results 2015. *Natural resources and bioeconomy studies 8/2019*, Natural Resources Institute Finland. 57 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-711-4>.
- Ni W., Woodcock C.E. (2000). Effect of canopy structure and the presence of snow on the albedo of boreal conifer forests. *Journal of Geophysical Research* 105(D9): 11879–11888. <https://doi.org/10.1029/1999JD901158>.
- Nikopensius M., Pisek J., Raabe K. (2015). Spectral reflectance patterns and seasonal dynamics of common understory types in three mature hemi-boreal forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 43: 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.11.012>.
- Peltoniemi J., Kaasalainen S., Näränen J., Rautiainen M., Stenberg P., Smolander H., Smolander S., Voipio P. (2005). BRDF measurement of understory vegetation in pine forests: dwarf shrubs, lichen and moss. *Remote Sensing of Environment* 94(3): 343–354. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.10.009>.
- Poulter B., MacBean N., Hartley A., Khlystova I., Arino O., Betts R., Hagemann S. (2015). Plant functional type classification for earth system models: results from the European Space Agency’s Land Cover Climate Change Initiative. *Geoscientific Model Development* 8(7): 2315–2328. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2315-2015>.
- Qu X., Hall A. (2007). What controls the strength of snow-albedo feedback? *Journal of Climate* 20(15): 3971–3981. <https://doi.org/10.1175/JCLI4186.1>.
- Qu Y., Liu Q., Liang S., Wang L., Liu N., Liu S. (2014). Direct-estimation algorithm for mapping daily land-surface broadband albedo from MODIS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 52(2): 907–919. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2245670>.
- Rautiainen A. (2019). On the optimal regulation of land use sector climate impacts. *Dissertationes Forestales* 274. 35 s. <https://doi.org/10.14214/df.274>.
- Rautiainen M., Stenberg P., Nilson T., Kuusk A. (2004). The effect of crown shape on the reflectance of coniferous stands. *Remote Sensing of Environment* 89(1): 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.10.001>.
- Rautiainen M., Möttöus M., Heiskanen J., Akujärvi A., Majasalmi T., Stenberg P. (2011a). Seasonal reflectance dynamics of common understory types in a Northern European boreal forest. *Remote Sensing of Environment* 115(12): 3020–3028. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.06.005>.
- Rautiainen M., Stenberg P. (2005). Application of photon recollision probability in coniferous canopy reflectance simulations. *Remote Sensing of Environment* 96(1): 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.02.009>.
- Rautiainen M., Stenberg P., Möttöus M., Manninen T. (2011b). Radiative transfer simulations link boreal forest structure and shortwave albedo. *Boreal Environment Research* 16: 91–100. <http://www.borenav.net/BER/pdfs/ber16/ber16-091.pdf>.
- Riihelä A., Manninen T. (2008). Measuring the vertical albedo profile of a subarctic boreal forest canopy. *Silva Fennica* 42(5): 228. <https://doi.org/10.14214/sf.228>.
- Riihelä A., Manninen T., Laine V., Andersson K., Kaspar F. (2013). CLARA-SAL: a global 28 yr timeseries of Earth’s black-sky surface albedo. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13(7): 3743–3762. <https://doi.org/10.5194/acp-13-3743-2013>.
- Sagan C., Toon O., Pollack J. (1979). Anthropogenic albedo changes and the Earth’s climate. *Science* 206(4425): 1363–1368. <https://doi.org/10.1126/science.206.4425.1363>.

- Schaaf C., Gao F., Strahler A., Lucht W., Li X., Tsang T., Strugnell N., Zhnag X., Jin Y, Muller J. (2002). First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. *Remote Sensing of Environment* 83(1–2): 135–148. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00091-3).
- Schaepman-Strub G., Schaepman M.E., Painter T.H., Dangel S., Martonchik J.V. (2006). Reflectance quantities in optical remote sensing-definitions and case studies. *Remote Sensing of Environment* 103(1): 27–42. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.03.002>.
- Stähli L., Jonas T., Gustafsson D. (2009). The role of snow interception in winter-time radiation processes of a coniferous sub-alpine forest. *Hydrological Processes* 23(17): 2498–2512. <https://doi.org/10.1002/hyp.7180>.
- Stenberg P., Lukeš P., Rautiainen M., Manninen T. (2013). A new approach for simulating forest albedo based on spectral invariants. *Remote Sensing of Environment* 137: 12–16. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.05.030>.
- Tan B., Woodcock C.E., Hu J., Zhang P., Ozdogan M., Huang D. ym. (2006). The impact of gridding artifacts on the local spatial properties of MODIS data: implications for validation, compositing, and band-to-band registration across resolutions. *Remote Sensing of Environment* 105(2): 98–114. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.06.008>.
- Vaahtera E., Aarne M., Ihalainen A., Mäki-Simola E., Peltola A., Torvelainen J., Uotila E., Ylitalo E. (2018). Suomen metsätilastot. Luonnonvarakeskus, Helsinki. 188 s. https://stat.luke.fi/sites/default/files/suomen_metsatilastot_2018_verkko.pdf.
- Wang L., Cole J.N., Bartlett P., Verseghy D., Derksen C., Brown R., von Salzen K. (2016). Investigating the spread in surface albedo for snow-covered forests in CMIP5 models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121(3): 1104–1119. <https://doi.org/10.1002/2015JD023824>.
- Warren S.G. (1982). Optical properties of snow. *Reviews of geophysics and space physics* 20(1): 67–89. <https://doi.org/10.1029/RG020i001p00067>.
- Webster C., Jonas T. (2018). Influence of canopy shading and snow coverage on effective albedo in a snow-dominated evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment* 214: 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.023>.
- Williams D. (1991). A comparison of spectral reflectance properties at the needle, branch, and canopy level for selected conifer species. *Remote Sensing of Environment* 35(2–3): 79–93. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90002-N](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90002-N).

65 viitettä.