

Miina Rautiainen, Pauline Stenberg ja Matti Möttus

Lehtialaindeksin kaukokartoituksesta

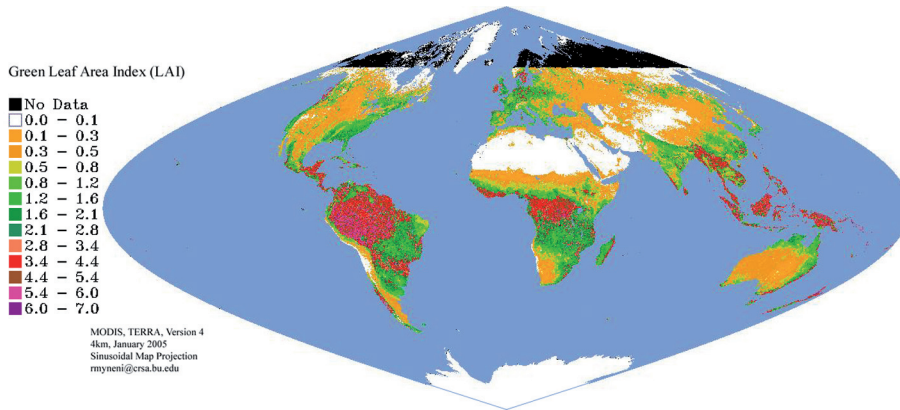
Johdanto

Legenda kertoo, että tiedustelusatelliittien avulla voidaan lukea Manhattanin autojen rekisterikilvet, sanomalehtien otsikot tai univormujen yksityiskohdat. Satelliittikuvien avulla on myös kylmän sodan aikana arvioitu toisen osapuolen viljasadon suuruutta ja kypsymisajankohtaa. Näiden asioiden poliittista tai taloudellista hyötyä ei ole koskaan kyseenalaistettu, vaan kaukokartoitustekniikoita on kehitetty entistä ehommiksi kilpailun kiristyessä ja poliittisten jännitteiden kasvaessa. Viime vuosina Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa on suunnattu merkittävästi aikaisempaa enemmän tutkimusrahoitusta – myös satelliittiohjelmien rahoittajilta – metsien lehtialaindeksin arvioimiseen laajoille alueille. Miksi? Onko tästä mitään hyötyä?

Lehtialaindeksitutkimuksen rahoituksen kasvu perustuu vihreän biomassan eli lehtialan tuntemisen välttämättömyyteen maailmanlaajuisissa biosfäärin ja ilmakehän vuorovaikutusmalleissa. Lehtialan määrä on lisäksi keskeisin metsästä heijastunutta lyhytaaltoista säteilyä muokkaava tekijä, mikä mahdollistaa sen arvoimisen optisista satelliittikuvista. Kansainvälistä tieteellistä ja hallinnollista kiinnostusta on lisännyt myös se, että lehtialaindeksin avulla voidaan arvioida ekosysteemien perustuotantoa ja tätä kautta hiilitasetta. Lehtialaindeksi on metsien tuotosta simuloivien prosessimallien tärkeimpiä muuttujia, sillä latvuksen haihdutus, hengitys ja yhteyttämistehokkuus riippuvat suoraan latvuksen lehtialasta. Lehtialaindeksillä on siten tärkeä rooli niin metsien terveydentilan kuin tuotoksen ja kehityksenkin seurannassa.

Lehtialaindeksin käsite esiintyy yhä useammin myös uusissa tutkimusjulkaisuissa useilla eri aloilla. Syynä tähän on nykyinen laaja mielenkiinto lehtialan tarpeellisuuteen erilaisissa meteorologisissa ja ekosysteemien prosesseja kuvaavissa malleissa sekä kasvillisuuden levinneisyyden ja terveydentilan tarkkailussa. Käsite ei ole uusi, vaan sen juuret ulottuvat aina 1940-luvulla saakka, jolloin Watson (1947) määritteli lehtialaindeksin perustuotantokologisessa tutkimusartikkelissaan ensimmäistä kertaa. Lehtialaindeksillä (*Leaf Area Index, LAI*) tarkoitetaan minkä tahansa kasvillisuuden, niin metsien kuin ruohikoidenkin, lehtien toispuolista pinta-alaa maapinta-alaa kohden (yksikkönä $m^2 m^{-2}$). Tämä määritelmä sopii hyvin litteälehtisille lajeille, mutta sen sijaan esimerkiksi havupuille voi toispuolisen lehtialan määrittely tuottaa hankaluuksia. Havuneulasille johdonmukainen määritelmä toispuoliselle pinta-alalle on puolet neulasen kokonaispinta-alasta eli vaippa-alasta (Chen and Black 1992, Stenberg 2006).

Vuosi 2000 oli merkkipaalu lehtialaindeksin kaukokartoituksessa: NASA:n rahoituksella tuotettiin Terra-satelliittiin sijoitetun MODIS-instrumentin satelliittikuvista maailman ensimmäiset koko maapalloa kattavat lehtialaindeksikartat kahdeksan vuorokauden välein (kuva 1). Tämä toiminta jatkuu yhä, ja nyt mukana ovat myös Aqua-satelliitin kuvat. Taustalla oli jo presidentti Reaganin kaudella Yhdysvaltain avaruushallinnossa NASA:ssa alkanut suurien tiedeprojektien (*Big Science Projects*) aikakausi, jolloin taakse olivat jääneet viljasatojen arviointeihin keskittyneet projektit ja sijalle olivat tulleet erilaiset globaalit ekologiset ongelmat, joiden selvittämiseen



Kuva 1. Maapallon LAI-kartta tammikuussa 2005 neljän kilometrin resoluutiolla. Tuotettu NASA:n LAI-algoritmeilla (Knyazikhin ym. 1998) Terra-satelliitin kuvista. Kuva: Ranga Myneni, Bostonin yliopisto.

hyödynnettiin kaukokartoitustietoa. 1980-luvulla nähtiinkin jo ensimmäiset mallit, jotka käyttivät satelliittikuvia useiden tuhansien neliökilometrien alueilta ja laskivat kasviekosysteemien perustuotantoa ja varovaisia arvioita lehtialaindeksistä. Voidaankin sanoa, että tästä alkoi maailmanlaajuisesti aivan uusi aikakausi ekologisessa tutkimuksessa. Systemien toiminnan ymmärtäminen ei enää perustunut yksittäisiin pistekohtaisiin meteorologisiin mittauksiin tai metsikkökuvioihin, vaan ekologisista ilmiöistä saatiin käsitys kokonaisten mantereiden tasolla.

Vuonna 2000 perustettiin myös kansainvälinen LPV-työryhmä suoraan Earth Observing Satellites (EOS) -komitean alle. LPV-työryhmä (*Land Product Validation group*) koordinoi ja luo standardeja kaukokartoitettujen biofysikaalisten muuttujien, kuten lehtialaindeksin, maankäyttöluokituksen ja kasvillisuuden albedon, arvioimiseen satelliittikuvilta. LPV-työryhmän toiminta perustuu siihen, että eri satelliittijärjestöjen 'tuotteita' (eli kaukokartoitettuja estimaatteja) voidaan käyttää toisen satelliittijärjestön tuotteiden laadun arvioimiseen (Morissette ym. 2006). Lisäksi työryhmä pyrkii edistämään mittausten ja tietokantojen avoimuutta ja käytettävyyttä kaikille kiinnostuneille tahoille.

Lehtialan kaukokartoituksen fyysikaalinen tausta

Ennen lehtialaindeksin kaukokartoitukseen käytettävien menetelmien läheisempää tarkastelua on hyödyllistä muistuttaa mieleen kaukokartoituksen perusteita. Kasvillisuuden optinen, passiivinen kaukokartoitus perustuu tarkasteltavasta kohteesta heijastuvan säteilyn eli kohteen ominaissäteilyn taltiointiin ja tulkintaan. Vihreän lehden absorboiman, läpäisemän ja heijastaman säteilyn määrä vaihtelee riippuen aallonpituudesta, mutta spektri on samankaltainen eri lajeille. Osuttuaan lehteen foton voi joko heijastua lehden pinnalta takaisin samaan puoliavaruuteen kuin mistä se saapui, läpäistä lehden ja jatkaa matkaansa kohti samaa puoliavaruutta kuin ennen lehden kohtaamista tai absorboitua lehden solukkoihin. Tietyllä aallonpituudella absorboituneen, läpäisemän ja heijastuneen säteilyn suhteellisten osuuksien summa on aina yksi. Sironneeksi säteilyksi nimitetään säteilyä, joka ei absorboitu lehteen, eli sirontakerroin on läpäisemän ja heijastuneen säteilyn osuuksien summa. Lehden spektrille ominaista on, että fotosynteesistä aktiivisen säteilyn alueella (400 nm–700 nm) absorptio on voimakasta, jonka jälkeen heijastus kasvaa nopeasti siirryttäessä lähi-infrapunasäteilyn alueelle (> 700 nm). Tätä punaisen ja lähi-infrapunasäteilyn rajalla esiintyvää heijastussuhteen nopeaa muutosta kutsutaan "punaiseksi reunauksi" (*red edge*), ja se on nimenomaan vihreiden lehtien ominaispiirre.

Fotosynteesistä aktiivisen säteilyn alueella lehden heijastus ja läpäisy ovat pientä, koska klorofylli absorboi näitä aallonpituuksia tehokkaasti, kun taas lähi-infrapunasäteilyn alueella lehtien solukkorakenne on merkittävin absorption määräävä tekijä. Keski-infrapunasäteilyn alueella (1350 nm–2700 nm) absorptio kasvaa taas, ja siihen vaikuttaa pääasiassa lehden vesipitoisuus.

Heijastussuhde on kohdepinnan heijastaman säteilyvuon suhde ideaaliseen pintaan (ts. säteilyä läpäisemättömään ja absorboimattomaan pintaan), kun valaistus- ja mittausgeometria ovat täysin samat. Heijastussuhde on siten laaduton suure, mutta se vaihtelee yleensä samalle kohteelle valaistus- ja mittaussuunnan funktiona. Kaksisuuntaisella heijastussuhdetekijällä (BDRF, *Bidirectional Reflectance Factor*) tarkoitetaan näiden kahden suunnan määrittämää heijastussuhdetta. Kasvuston heijastussuhde vaihtelee auringon ja satelliittiin tai lentokoneeseen sijoitetun mittausanturin kulmista riippuen, koska nämä vaikuttavat kasvuston valossa ja varjossa olevien osien määrään. On huomattava, että kasvuston heijastusta mitattaessa kasvustoon lankeava säteily ei koskaan saavu pelkästään auringon suunnasta, vaan sisältää aina myös taivaalta tullutta hajasäteilyä, eikä mitattu suure tarkasti ottaen vastaa kaksisuuntaista heijastussuhdetekijää. Pilvettömällä säällä, jota satelliittimittauksissa suositaan, hajasäteilyn osuus on kuitenkin vähäinen eikä juuri vaikuta kasvustosta ulos heijastuneen säteilyn suuntajakaumaan.

Metsän heijastusspektri muistuttaa lehden spektriä, koska yleensä suurin osa kasvuston heijastuksesta on peräisin lehdistä. Vihreän lehvästön heijastus on kuitenkin pienempi kuin yksittäisen lehden, sillä osa lehdistä heijastuneesta säteilystä törmää toisiin lehtiin sen sijaan, että säteily heijastuisi ensimmäisen lehden kohtaamisen jälkeen suoraan ulos kasvustosta. Punaisen säteilyn (630 nm–690 nm) heijastussuhteen on havaittu olevan käänteisesti verrannollinen kasvuston klorofyllipitoisuuteen, sillä vihreiden lehtien pigmentit absorboivat tehokkaasti punaista säteilyä. Metsän heijastussuhdetta muokkaa kuitenkin myös aina aluskasvillisuudesta ja maasta tuleva heijastussignaali.

Lehtialaindeksin optiset, passiiviset kaukokartoitusmenetelmät

Lehtialaindeksin alueellisessa tai maailmanlaajuisessa arvioinnissa ainoa käyttökelpoinen menetelmäryhmä ovat kaukokartoitustekniikat. Suurin osa nykyisistä tutkimusresursseista on suunnattu passiivisten, optisten kaukohavaintojen tulkintaan. Tähän mennessä lehtialaindeksikartoja on tuotettu hyvin karkealla resoluutiolla (esim. 4 km MODIS-kuvista) sekä tarkemmalla metsikkötason resoluutiolla (20–30 m) SPOT- ja Landsat-kuvista. Karttojen tuottamiseen käytetyt menetelmät jakaantuvat ensisijaisesti kahteen isoon ryhmään: tilastollisiin ja fysikaalisiin, sekä lopulta myös näiden kahden menetelmäryhmän erilaisiin yhdistelmiin.

Tilastollisissa menetelmissä laaditaan regressioyhtälöitä satelliittikuvan eri kanavien heijastussuhteiden tai monikanavamuunnosten (eli kasvillisuusindeksien kuten NDVI, RSR tai SR) ja maastossa mitatun lehtialaindeksin välille. Monikanavamuunnosten tarkoituksena on minimoida metsikön taustan heijastus verrattuna kasvillisuuden heijastussuhteeseen. Näiden menetelmien yleinen ongelma on huono yleistettävyyttä: regression soveltaminen toiselle satelliittikuvatyyppille ei useimmiten ole luotettavaa mm. kanavien aallonpituusalueiden, ilmakedäkorjausten ja maaresoluutioiden eroavuuksien vuoksi.

Vaihtoehtoisesti voidaan rakentaa tutkimusmetriikka kuvaava fysikaalinen malli, jonka avulla tutkitaan saapuvan ja heijastuvan säteilyn kulkua kasvustossa sekä eri tekijöiden, kuten puiden pituuden, latvusmuodon tai lehtialaindeksin, sekä auringon- ja mittauskulmien merkitystä heijastussignaalin muodostumisessa. Nämä mallit perustuvat yleensä fysiikasta tunnetun säteilynkulun yhtälöön (Chandrasekhar 1950), jonka avulla kuvataan säteilyn kulkua kasvustoon, kasvustossa ja lopulta ulos kasvustosta ja kohti satelliittikeilainta. Fysikaaliset mallit pyrkivät siten selittämään millä tavalla metsikön heijastussignaali syntyy ja mitkä metsän rakennetta kuvaavat muuttujat ovat siinä keskeisessä roolissa. Mallien tuottamia metsien rakenteen ja spektrin välisiä relaatioita voidaan sitten soveltaa myös tilastollisiin menetelmiin perustuvassa satelliittikuvatulkinnassa. Keskeisenä etuna puhtaasti tilastollisiin menetelmiin fysikaalisilla malleilla on se, että niiden käyttö ei ole keilainsidonnaista ja mallit

ovat täten huomattavasti yleistettävämpiä.

Globaalien satelliittikuvatulokintamenetelmien toiminta perustuu luotettaviin kasvillisuusvyöhykekohtaisiin malleihin. Tällä hetkellä kuitenkin yleisimmin käytetyt kaukokartoitusmallit tuottavat edelleen epätarkkoja estimaatteja nimenomaan havumetsien lehtialaindeksistä, joten algoritmejä pitää kehittää havumetsien ominaispiirteitä paremmin huomioiviksi. Kuten viime aikaisissa tutkimuksissa on noussut vahvasti esille, havumetsien rakenteessa on useita erityispiirteitä, jotka vaikeuttavat niiden biofysikaalisten muuttujien (joita ovat esimerkiksi lehtialaindeksi, latvuspeitto tai kasvuston sitoma fotosynteesistä aktiivinen säteily) tulkitusta kaukokartoitusaineistoista. Alueellemme tyypillisiä erityisongelmia – tai sanottakoon haasteita – lehtialaindeksin arvioimisessa satelliittikuvilta ovat metsän vahvasti hierarkkinen latvusrakenne eli ryhmittyneet versot ja latvukset sekä monipuolinen (ja satelliitin selvästi näkemä) aluskasvillisuus.

Havumetsille optiset kaukokartoitusmenetelmät lehtialaindeksin arvioimiseksi vaativat vielä kehittämistä ja lisää perustutkimusta metsästä heijastuneen säteilyn ja metsän rakenteen sekä lehtialaindeksin välisen riippuvuussuhteen kvantifioimiseksi. Tulevaisuudessa havumetsävyöhykkeen ominaispiirteet on varmasti jossain määrin tehokkaasti mahdollista integroida globaaleihin lehtialan kartoittamiseen tarkoitettuihin malleihin, mutta tähän mennessä työtä asian korjaamiseksi on tehty maailmalla vähän, sillä työ vaatii vankkaa teoreettista perustaa metsikön säteilymallien kehittämisessä. Onnistuneen kaukokartoitusmenetelmän kehittäminen edellyttää myös maastomittausten tarkkuuden parantamista, sillä esimerkiksi runsaasti maastomittauksissa käytetyn ja satelliittikuville kalibrointiaineistoa tuottavan optisen lehtialamittausmenetelmän (LAI-2000 *Plant Canopy Analyzer* -laitteen) on todettu aliarvioivan havumetsän lehtialaindeksiä. Näitä haasteita ei ole pystytty ottamaan huomioon globaaleissa lehtialaindeksin ennustamiseen kehitetyissä malleissa, joten boreaalisen vyöhykkeen kartat ovat vielä puutteellisia ja niin puhtaasti teoreettista kuin soveltavampainkin työtä asian parissa työskenteleville riittää.

Lehtialaindeksin kaukokartoitustoimintaa Suomessa

Perinteisten puustotunnusten rinnalla tarkastellaan yhä useammin metsän muita arvoja, ja näin ollen myös kaukokartoitusta on hyödynnettävä yleisemmässä ympäristöntilan seurannassa. Lehtialaindeksin kaukokartoituksesta voi tulla jopa ”bisnestä”, kun lasketaan hiilitaseita ja käydään päästökauppaa. Tällä hetkellä suomalainen lehtialaindeksin kaukokartoitusosaaminen on edustettuna kolmessa kansainvälisessä verkostossa, jo aikaisemmin mainitussa LPV-työryhmässä, yhteispohjoismaisessa NorSEN-verkostossa sekä yleiseurooppalaisessa VALERI-verkostossa. Suomen, Ruotsin ja Norjan yhteinen NorSEN-verkosto toimii EU-rahoitteisena kalottialueella alkaen vuodesta 2005, ja yksi sen kiinnostuksen kohteista on juuri lehtialaindeksi. VALERI-verkosto sen sijaan perustettiin eurooppalaisen yhteistyön tuloksena ja Ranskan avaruusjärjestön CNES:in tuella vuonna 2000. Verkosto kehittää satelliittikuvien tulokintamenetelmiä kasvillisuuspeitteen, lehtialan ja yhteyttämiseen käytettävissä olevan säteilyn määrän arvioimiseksi. Koko Suomea kattavaa lehtialaindeksi karttaa ei ole kuitenkaan vielä tuotettu suomalaisin voimin, vaan tutkimukset ovat tähän mennessä keskittyneet tulokintamenetelmien kehittämiseen ja testaamiseen pienemmille alueille Keski- ja Pohjois-Suomessa.

Kuudessakymmenessä vuodessa lehtialaindeksi on tehnyt pitkän matkan ekologien tutkimuksissa ja saavuttanut myös kaukokartoittajien mielenkiinnon. Mitä seuraavaksi?

Viitteet

- Chandrasekhar, S. 1950. Radiative transfer. Oxford University Press, London, UK. 393 s.
- Chen, J. & Black, T. 1992. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell and Environment* 15: 421–429.
- Knyazikhin, Y., Martonchik, J., Myneni, R., Diner, D. & Running, S. 1998. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *Journal of Geophysical Research* D103: 32257–32275.

- Morisette, J., Privette, J., Baret, F., Myneni, R., Nickerson, J., Garrigues, S., Shabanov, N., Fernandes, R., Leblanc, S., Kalacska, M., Sanchez-Azofeifa, G., Chubey, M., Rivard, B., Stenberg, P., Rautiainen, M., Voipio, P., Manninen, T., Pilant, D., Lewis, T., Iiames, T., Colombo, R., Meroni, M., Busetto, L., Cohen, B., Turner, D., Warner, E. & Petersen, G. 2006. Validation of global moderate resolution LAI Products: a framework proposed within the CEOS Land Product Validation subgroup. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44(7): 1804–1817.
- Stenberg, P. 2006. A note on the G-function for needle leaf canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* 136(1–2): 76–79.
- Watson, D.J. 1947. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany* 11: 41–76.

6 viitettä

- MMT Miina Rautiainen, Helsingin yliopisto, Metsäekologian laitos Sähköposti miina.rautiainen@helsinki.fi;
MMT Pauline Stenberg, SNS (c.o. Metla, Helsinki)
Sähköposti pauline.stenberg@metla.fi
FT Matti Möttus, Tarton observatorio, Ilmakehäfysiikan osasto
Sähköposti mottus@ut.ee