

Miina Rautiainen ja Janne Heiskanen

Metsän vuodenaikaisvaihtelut satelliittikuvissa

Kaukokartoituksella tietoa kasvipeitteestä

Muutokset maapallon kasvipeitteessä ovat saaneet runsaasti huomiota viimeaikaisessa ilmastomuutostutkimuksessa, koska ilmastomuutos vaikuttanee maapallon kasvillisuuden perustuotantoon, levinneisyyteen ja rakenteeseen. Toisaalta kasvipeite ja sen muutokset vaikuttavat erilaisten takaisinkytkentöjen kautta ilmastoon.

Satelliittikuvien käyttö ympäristötilan seurannassa on lisääntynyt viimeisen vuosikymmenen aikana hyvin merkittävästi. Satelliittikaukokartoituksella voidaan arvioida mm. maapallon metsien levinneisyyttä ja kehityssuuntia sekä vuodenaikaisdynamikkaa. Satelliittikuvat ovat saamassa tärkeän roolin myös tarkasteltaessa puolueettomasti maapallon kasvillisuuden ja ilmaston välisiä kytkentöjä.

Boreaalisten metsien vuodenaikaisdynamikan ymmärtäminen on tulevaisuudessa edellytys biosfäärin ja ilmakehän välisten monimutkaisten vuorovaikutussuhteiden määrittelemiselle kuin myös realistisille tuotosekologisille ennusteille. Kasvillisuuden vuodenaikaisvaihteluiden ja fenologian seuraaminen satelliittikuvista onkin kuluneen vuosikymmenen aikana noussut runsaasti tutkituksi aiheeksi. Tutkimusta ovat merkittävästi edistäneet myös sopivien satelliittikuva-aineistojen runsastuminen ja helpompi saatavuus.

Satelliittikuvien merkittävä etu on se, että kasvillisuuden fenologiaa voidaan tutkia niin spatiaalisesti kuin ajallisestikin jatkuvasti eikä ainoastaan pistehavaintojen perusteella. Tulkitsemalla satelliittikuvia arvioitiin jo kymmenkunta vuotta sitten, että maapallon pohjoiset alueet ovat vihertyneet. Vastaavia

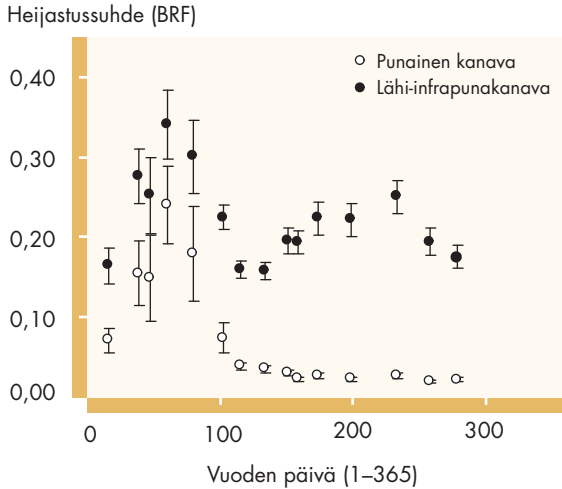
tutkimuksia on tehty myös esimerkiksi Amazonin alueella, jossa on MODIS-satelliittikuvia analysoimalla havaittu 25 %:n vuodenaikaisvaihteluita sademetsien vihreän biomassan määrässä.

Metsän spektri vaihtelee

Metsän spektrille ominaista on, että fotosynteettisesti aktiivisen säteilyn alueella (noin 400–700 nm) absorptio on voimakasta ja lehden heijastus sekä läpäisy vähäistä, koska klorofylli absorboi näitä aallonpituuksia tehokkaasti. Heijastus kasvaa nopeasti siirryttäessä lähi-infrapunasäteilyn alueelle (>700 nm). Keski-infrapunasäteilyn alueella (1350–2700 nm) absorptio kasvaa jälleen, jolloin siihen vaikuttaa pääasiassa lehden vesipitoisuus.

Kasvillisuuden vuodenaikaisvaihteluiden tulkinta optisilta satelliittikuvilta perustuu siihen, että punaisella (n. 600–700 nm), lähi-infrapuna- (n. 700–1300 nm) ja keski-infrapuna- (n. 1300–2700 nm) aallonpituudella mitatut heijastussuhteet riippuvat yhteyttävän kasvillisuuden määrästä (eli vihreästä biomassasta) sekä kasvukauden aikana vaihtelevista kasvillisuuden biokemiallisista ominaisuuksista kuten klorofylli- ja vesipitoisuudesta. Kasvukauden aikaiset muutokset näissä ominaisuuksissa johtavat muutoksiin metsän spektrissä, jota satelliittien optiset kaukokartoitusinstrumentit mittaavat (kuva 1). Vuosien väliset erot metsän kosteudessa voidaan myös havaita spektrien eroina.

Boreaalisen lehtimetsän heijastussuhteiden vaihtelut ovat kasvukauden aikana suurempia kuin havumetsän vastaavat. Satelliittikuva-analyysin ja



Kuva 1. Esimerkki boreaalisen metsän heijastussuhteiden vuodenaikaismuutoksista Hyytiälän metsäseman ympäristössä (7 km x 7 km alue) vuonna 2009. Pilvettömät, 16 vuorokauden keskiarvot MODIS-satelliittikuvien heijastussuhteista punaisella (620–670 nm) ja lähi-infrapuna- (841–876 nm) kanavalla.

heijastusmallinnuksen avulla on lisäksi tunnistettu tärkeimmiksi heijastussuhteiden vuodenaikaisdynamiikkaan vaikuttaviksi tekijöiksi metsän latvus- ja kenttäkerroksen lehtialaindeksi, metsikön tiheys (runkoluku) ja mahdollinen metsän pohjalla oleva lumi. Myös kenttäkerroksen kasvillisuuden heijastussuhteissa on havaittu voimakkaita muutoksia kesän aikana: metsätyyppien väliset heijastussuhteet tyypillisesti korostuvat kasvukauden edetessä. Tähän mennessä kvantitatiivisia yhteyksiä kasvillisuuden heijastussuhteen ja rakenteellisten (kuten yhteyttävän lehtialan määrän) sekä biokemiallisten ominaisuuksien (kuten klorofylli- ja vesipitoisuuden) vuodenaikaisvaihteluiden välillä ei ole kuitenkaan vielä systemaattisesti selvitetty. Lisäksi varhaiskevällä metsän pohjalla olevan lumen vaikutus satelliittikuvilta tulkittuun kasvukauden alun ajankohtaan on vielä selvittämättä.

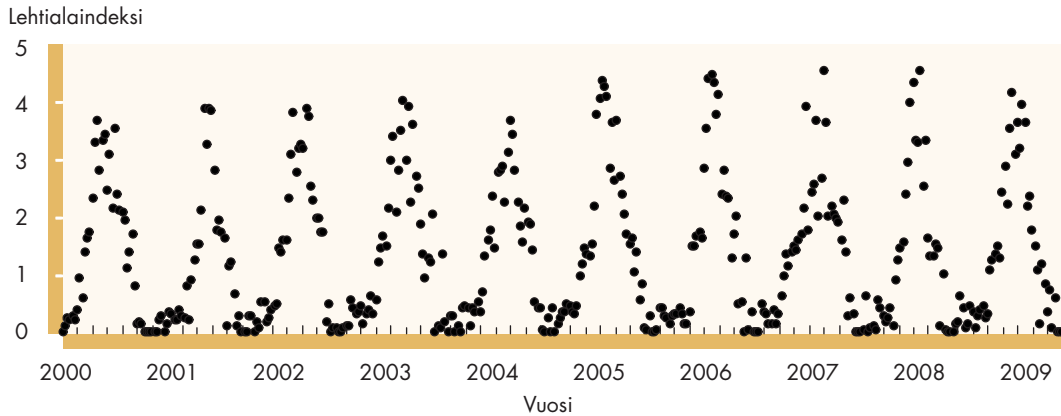
Karkean resoluution satelliittikuvat suosituimpia

Lauhkean ja boreaalisen metsävyöhykkeen vuoden-

aikaisvaihteluiden seurannassa on hyödynnetty eniten karkean resoluution satelliittikuvia kuten Terra/Aqua MODIS-, NOAA AVHRR- ja Spot Vegetation-kuvia, joiden erotuskyky vaihtelee muutamasta sadasta metrillä useisiin kilometreihin. Analysoimalla karkean resoluution satelliittikuvia saadaan tietoa kasvukauden pituudesta ja sen mahdollisista muutoksista, joita tarvitaan mm. moniin ilmastomuutokseen liittyviin selvityksiin. Satelliittikuvista muodostettujen aikasarjojen avulla voidaan myös arvioida vihreän biomassan vuotuista vaihtelua (kuva 2).

Tähän saakka tutkimukset ovat keskittyneet yleisten fenologisten trendien kartoittamiseen tai kasvuvaiheiden tulkintaan liittyvään menetelmäkehitykseen. Kasvillisuuden pitkäaikaismuutosten seurannassa hyvin tärkeitä ovat karkearesoluutioiset NDVI-kasvillisuusindeksin (normalized difference vegetation index) aikasarjat. Pisimmät NOAA AVHRR -kuviin perustuvat aikasarjat tarjoavat kasvillisuusindeksi havainnon kahdesti kuukaudessa vuodesta 1981 alkaen. Kuvasarjojen käsittelyssä on pyritty normalisoimaan mahdollisimman hyvin kaikista muusta kuin kasvillisuuden muutoksista aiheutuvat heijastuserot (mm. sensoreiden kalibrointierot, katselugeometria, ilmakehä). Koska tarve seurata kasvillisuuden pitkäaikaismuutoksia on korostunut viimeaikoina, vanhojen, nykyisten ja tulevien satelliittihavaintojen yhdistäminen entistä yhtenäisemmiksi aikasarjoiksi säilyy keskeisenä tutkimusalueena. Yksi tärkeimpiä syitä NDVI:n käyttöön pitkäaikaisissa aikasarjoissa on että se voidaan laskea AVHRR-instrumentin kanavista (punainen ja lähi-infrapuna). Boreaalisten havumetsien vuodenaikaisvaihtelujen seurantaan NDVI ei kuitenkaan välttämättä ole kaikkein paras indeksi, sillä sen on havaittu korreloivan varsin heikosti havupuiden lehtialan kanssa. Vaikka uudemmat instrumentit (mm. MODIS) mahdollistavat kehittyneempien indeksien laskemisen, havumetsien NDVI-signaalien parempi ymmärtäminen olisi kuitenkin tärkeää aikasarjojen oikean tulkinnan kannalta.

Karkean resoluution satelliittikuvien hyödyntämistä monimutkaistavat ympäristön pirstaleisuus ja lajirikkaus. Näiden seurauksena satelliittikuvissa on runsaasti ns. sekapikseleitä, jotka edustavat esimerkiksi useaa eri kasvillisuustyyppiä tai maankäyttöluokkaa. Ratkaisuksi sekapikseleiden pilkkomiseen



Kuva 2. Esimerkki boreaalisen metsän lehtialaindeksin (LAI) vuodenaikaisuutoksista Hyytiälän metsäaseman ympäristössä (7 km x 7 km alue) vuosina 2000–2009. Pilvettömät, 8 vuorokauden keskiarvot MODIS-satelliittikuvista lasketuista LAI-arvoista (MOD15A2). MODIS-satelliittikuvien LAI-arvot vaihtelevat runsaasti vuoden aikana – talvikaudella esiintyy boreaalaisella vyöhykkeellä usein LAI:n aliarvioita johtuen pilvi- ja lumipeitteestä sekä matalasta auringonkulumasta.

tai tulkintaan on luonnollisesti kehitetty tilastollisia menetelmiä, mutta eivät nekään poista taustalla olevaa ongelmaa. Näin ollen satelliittikuvien avulla voidaan parhaiten seurata kasvillisuuden fenologiaa maisematasolla. Yksittäisen kasvilajin kehitysvaiheiden tunnistaminen sen sijaan on hyvin vaikeaa ellei ympäristö ole erityisen homogeeninen. Säännöllisten aikasarjojen muodostaminen satelliittikuvista on myös usein ongelmallista sääolosuhteiden takia – boreaalaisella vyöhykkeellä on kasvukauden aikana vain vähän täysin pilvettömiä päiviä. Tämän vuoksi tavallisesti ei ole mahdollista päästä päivämääräkohtaiseen tarkkuuteen eri kasvuvaiheiden ajoituksessa. Näistä ongelmista huolimatta satelliittikuvien tärkeä etu on kuitenkin se, että keskinkertaisimmillaankin ne tarjoavat mahdollisuuden havaita kasviekosysteemien vuodenaikaisdynamikassa sellaisia laajalajaisia trendejä, joita maan päältä katsottuna ei ole mahdollista tunnistaa.

Keskeisen työvaiheen metsän vuodenaikaisvaihteluiden kaukokartoituksessa muodostaa fenologisten estimaattien oikeellisuuden varmentaminen. Yksinkertaiseen kysymykseen ”Kuinka maastossa tehtyjä perinteisiä fenologisia havaintoja tulisi verrata satelliittikuvista arvioituihin arvoihin?” on varsin vaikea vastata. Kaikille tutut fenologiset tunnuksukset kuten hiirenkorvat, kukinnot tai täysikasvuiset lehdet eivät

itsessään vaikuta sähkömagneettisen säteilyn käyttäytymiseen kasvustossa vaikkakin jossain määrin korreloivat punaisilla ja lähi-infrapuna aallonpituuksilla havaittujen spektrimuutosten kanssa. Fenologisten tunnusten, joita satelliittikuvista voidaan tulkita, tulee olla biofysikaalisia muuttujia eli muuttujia joita suoraan arvioidaan sähkömagneettisesta spektristä, kuten esimerkiksi kasvillisuuden absorboiman fotosynteesistä aktiivisen säteilyn määrä, lehtialaindeksi tai kasvuston klorofyllipitoisuus. Suomessa on tiivis ja monipuolinen fenologisten maastohavaintojen verkko, joka tarjoaa hyvää tukea satelliittipohjaisten menetelmien kehitystyölle. Tulevaisuuden tehtävänä on kuitenkin maastossa tehtyjen pistehavaintojen tilastollinen ekstrapolointi satelliittikuvan kattamaa aluetta vastaavaksi. Kun siirrytään arvioimaan kasvillisuuden vihertymistä ja kellastumista Suomen rajojen ulkopuolelle (esimerkiksi globaalilla tasolla), ei maastohavaintoja ole mahdollista hyödyntää juuri ollenkaan vertailukohtana.

Ajankohtaisia tutkimuskysymyksiä

Erityisen ongelman boreaalisen vyöhykkeen fenologisten vaiheiden kaukokartoitukselle tuottavat lu-

men lisäksi erot kenttä- ja latvuskerroksen vuodenaikaiskierroissa: lehtimetsissä kenttä- ja pohjakerros vihertävät usein jo ennen latvuskerrosta aiheuttaen liian varhaisia arvioita satelliittikuvista tulkitulle lehteentulolle. Havumetsissä taas kenttäkerroksen spektriset muutokset voivat olla suurempia kuin latvuskerroksen vastaavat muutokset, jolloin esimerkiksi neulasten variseminen ja uuden vuosikasvaimen ilmestyminen eivät ole suoraviivaisesti tulkittavissa satelliittikuvista.

Tällä hetkellä keskeisiä tutkimuskysymyksiä boreaalisten metsien fenologian kaukokartoituksessa ovat satelliittikuvissa havaittujen heijastussuhdemuutosten kytkeminen niin metsän lehtialassa, latvuspeitossa ja biokemiallisissa ominaisuuksissa tapahtuviin muutoksiin kuin myös perinteisiin fenologisiin havaintoihin. Työtä tehdään liittämällä satelliittikuvista muodostettuihin aikasarjoihin metsän fysikaaliset heijastusmallit ja maastossa tehdyt vuodenaikaismittaukset. Tämän jälkeen voidaan päätellä kuinka luotettavasti kasvukauden eri vaiheet on mahdollista arvioida sekä mitä laskentamenetelmiä ja aallonpituusalueita satelliittikuvien tulkinnaassa tulisi hyödyntää.

Keskeistä fenologian kaukokartoittamisen kannalta on myös se, että arvioidaan muutoksia satelliittikuvissa, joilla on erilaiset erotuskyvyt (20 m–1 km). Vaikka maanpinnalla fenologiset ilmiöt ovat samoja riippumatta missä mittakaavassa niitä tarkastellaan, niin satelliittikuvan resoluutio voi olla pirstaleisessa ympäristössä ratkaiseva tekijä eri kehitysvaiheiden erottamiselle. Tutkimus- tai sovelluskohteesta riippuu millaista satelliittikuvamateriaalia on tarpeen käyttää.

Tulevaisuudessa tutkittaneen metsän spektrin vuodenaikaisvaihteluita myös uusimpien hyperspektriaineistojen avulla. Kuumana tutkimusmateriaalina säilynevät myös karkean resoluution satelliittikuvat, jotka kattavat koko maapallon jo pitkälti ajalta ja ovat helposti saatavilla laaja-alaisia ympäristösovelluksia varten. Menetelmäkehityksen puolella taas metsän fysikaaliset heijastusmallit tulevat saamaan entistä enemmän huomiota, koska ne eivät ole satelliitti-instrumentista riippuvaisia ja toimivat kaikilla aallonpituusalueilla sekä kaikissa mittauskulmissa. Uskommekin, että viiden vuoden päästä myös boreaalisen metsän spektrisistä vuodenaikaisvaihteluista tiedetään paljon uutta.

Kiitokset

Tutkimustamme rahoittavat Suomen Akatemia, Emil Aaltosen säätiö ja Helsingin yliopiston rahastot.

Kirjallisuutta

- Garrigues, S., Lacaze, R., Baret, F., Morissette, J., Weiss, M., Nickeson, J., Fernandes, R., Plummer, S., Shabanov, N., Myneni, R., Knyazikhin, Y. & Yang, W. 2008. Validation and intercomparison of global Leaf Area Index products derived from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research* 113(G02028): 1–20.
- Miller, J., White, P., Chen, J., Peddle, D., McDemid, G., Fournier, R., Shepherd, P., Rubinstein, I., Freemantle, J., Soffer, R. & LeDrew, E. 1997. Seasonal change in the understory reflectance of boreal forests and influence on canopy vegetation indices. *Journal of Geophysical Research* 102: D24: 29475–29482.
- Rautiainen, M., Nilson, T. & Lökk, T. 2009. Seasonal reflectance trends of hemiboreal birch forests. *Remote Sensing of Environment* 113: 805–815.
- Zhou, L., Tucker, C. Kaufmann, R., Slayback, D., Shabanov, N. & Myneni, R. 2001. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research* 106(D17): 20069–20083.

■ MMT, dosentti Miina Rautiainen, FT Janne Heiskanen, Helsingin yliopisto, metsätieteiden laitos
Sähköposti miina.rautiainen@helsinki.fi