

Geodiversiteetin tutkiminen kaukokartoituksella

Sini Ollila

LuK-seminaari ja tutkielma 790351A

Maantieteen tutkinto-ohjelma

12.5.2022

Tiivistelmä

Tutkielman tarkoitus on selvittää, miten kaukokartoitusmenetelmiä voidaan hyödyntää geodiversiteetin tutkimisessa. Geodiversiteetin merkitys elollisen luonnon perustana on vasta viime vuosikymmeninä alettu ymmärtämään ja siihen kohdistuvan tutkimuksen määrä kasvaa. Kaukokartoitusmenetelmät kehittyvät jatkuvasti, ja tietokoneiden kapasiteetin kasvaessa kaukokartoitusaineistojen käsittely tehostuu, avaten uusia mahdollisuuksia myös geodiversiteettitutkimuksessa. Tietoa geodiversiteetistä tarvitaan, jotta osataan arvioida ihmistoiminnan vaikutuksia, varautua ilmastonmuutokseen ja suunnata ympäristöön kohdistuvia suojelutoimia mahdollisimman hyvin.

Kaukokartoitusmenetelmistä lähemmässä tarkastelussa tässä tutkielmassa ovat Lidar-menetelmä sekä multi- ja hyperspektraalisten sensoreiden käyttö. Tutkielmassa käydään myös läpi, miten aineiston pohjalta voidaan tutkia tietyn alueen geodiversiteetin määrä. Kyseisillä menetelmillä voidaan kartoittaa geodiversiteetin osia eri mittakaavoissa. Menetelmiä yhdistelemällä voidaan saada sekä laaja että tarkka kuva tutkittavan alueen geodiversiteetin elementtien esiintymisestä. Eri aineistojen prosessointi, tulkitseminen ja yhdistäminen vaatii kuitenkin asiantuntijuutta. Lisäksi tarvittaisiin yhteneväisyyttä geodiversiteetin kvantifioimisen menetelmiin.

Kaukokartoitusmenetelmät tarjoavat kustannustehokkaan ja laajojen alueiden tutkimiseen soveltuvan tavan kerätä aineistoa geodiversiteetistä. Aiemmin kerättyjä aineistoja voidaan myös hyödyntää ja saada siten ymmärrystä geodiversiteetissä tapahtuvista muutoksista. Tulevaisuudessa pilvipalvelujen ja yhä tehokkaampien tietokoneiden avulla myös kaukokartoitusmenetelmien käyttö geodiversiteetin tutkimisessa tulee helpottumaan ja monipuolistumaan entisestään.

Sisältö

| | |
|--|----|
| 1 Johdanto | 4 |
| 2 Geodiversiteetti | 6 |
| 3 Kaukokartoitus | 8 |
| 3.1 Light detection and ranging | 9 |
| 3.2 Multispektraaliset sensorit | 11 |
| 3.3 Hyperspektraaliset sensorit | 12 |
| 4 Kaukokartoitusmenetelmien käyttö geodiversiteetin kartoittamisessa | 13 |
| 4.1 Lidar-menetelmä geodiversiteetin kartoituksessa | 13 |
| 4.2 Multispektraaliset sensorit geodiversiteetin kartoituksessa | 15 |
| 4.3 Hyperspektraaliset sensorit geodiversiteetin kartoituksessa | 17 |
| 4.4 Geodiversiteetin laskeminen kaukokartoitusaineistosta | 18 |
| 5 Pohdinta | 19 |
| 5.1 Haasteet | 20 |
| 5.2 Hyödyt | 21 |
| 5.3 Tulevaisuus | 23 |
| 7 Lähteet | 25 |

1 Johdanto

Ihmiskunta on kuluttanut maapallon tarjoamia resursseja yhä kiihtyvällä tahdilla viime vuosikymmenten ajan (Dasgupta, 2021: 5). Tämä on johtanut hälyttävään tilanteeseen, jossa ilmastomuutos ja biodiversiteettikato ovat jo nykypäivää. Niiden hidastamiseksi, sekä niihin sopeutumiseksi, tarvitaan tehokkaita keinoja oppia lisää ja hyödyntää tietoa maapallosta. Tietoa tarvitaan sekä globaalissa että paikallisessa mittakaavassa. Mittakaavasta riippuen in situ- eli paikalla tapahtuva tutkimus voi olla kallista, aikaa vievää ja fyysisesti haastavaa, ja laajojen alueiden tutkimiseen tarvitaan muita menetelmiä (esim. Hjort & Luoto 2012). Kaukokartoituksen avulla maapalloa voidaan tutkia laaja-alaisesti ja tehokkaasti, ja tätä tietoa voidaan käyttää ohjaamaan päätöksentekoa (Liang & Wang 2019: 2). Kaukokartoituksen mahdollistava teknologia kehittyy jatkuvasti tarjoten yhä uusia mahdollisuuksia maanpinnan tutkimiseen, ja tämän kehityksen valjastaminen voi olla askel kohti globaalien ongelmien ratkaisua.

Jotta voitaisiin esimerkiksi hidastaa biodiversiteettikatoa, on ymmärrettävä mitä edellytyksiä biodiversiteetin olemassaololla on. Yksi näistä edellytyksistä on eloton luonto. Eloton ympäristö luo pohjan elävälle luonnolle, ja vastavuoroisesti bioottinen ympäristö muokkaa elotonta ympäristöä (Johansson, 2000: 30). Monimuotoinen eloton luonto, eli geodiversiteetti, mahdollistaa elollisen luonnon monimuotoisuuden. Myös ilmastonmuutokseen sopeutuminen mahdollistuu osaltaan elottoman luonnon vaihtelevuuden avulla. Gordonin ym. (2018) mukaan runsas geodiversiteetti edistää ilmastonmuutokseen ja sen seurauksiin sopeutumista. Esimerkiksi alueilla, jossa on paljon korkeuseroja ja erityyppistä maaperää, ja pinnanmuodot sekä kasvulosuhteet vaihtelevat tiheään, lajisto pystyy vaihtamaan paikkaa ja sopeutumaan ilmastonmuutokseen paremmin kuin geodiversiteetiltään köyhällä alueella (Gordon ym. 2018). Tämä on erittäin tärkeää, sillä ilmaston lämpenemisen myötä useat kasvi- ja eläinlajit siirtyvät mahdollisuuksien mukaan korkeammalle ja kohti napoja, niille ominaisten elinolojen perässä. Runsas geodiversiteetti luo näitä mahdollisuuksia.

Koska geodiversiteetillä ja kaukokartoituksella on paikkansa osana suurten globaalien ongelmien ratkaisua, tämän tutkielman tarkoituksena on selvittää, miten kaukokartoitusta voidaan hyödyntää geodiversiteetin tutkimisessa. Tutkimuskysymyksiäni ovat:

1. Miten Lidar-menetelmää sekä multi- ja hyperspektraalisia sensoreita on hyödynnetty geodiversiteetin osatekijöiden tutkimisessa
2. Miten em. kaukokartoitusaineistojen perusteella voidaan laskea alueen kokonaisgeodiversiteetin määrä

Tutkimus toteutetaan kirjallisuuskatsauksena, jonka keskiössä ovat Lidar-menetelmää sekä multi- ja hyperspektraalisia aineistoja hyödyntäneet tutkimukset, joiden kohteena on ollut jokin geodiversiteetin osa. Nämä menetelmät valikoituivat eri kaukokartoitusmenetelmien joukosta, sillä jokaisella niillä on erityisvahvuutensa geodiversiteetin osatekijöiden tutkimisessa. Tuloksena on selkeä kuva siitä, miten kyseiset menetelmät ovat olleet hyödyksi geodiversiteetin osien kartoittamisessa, ja miten niitä voi hyödyntää tulevissakin tutkimuksissa sekä kokonaisgeodiversiteetin laskemisessa.

2 Geodiversiteetti

Termi geodiversiteetti on otettu käyttöön 1990-luvulla (Gray 2018: 13). Termi kuvaa elottoman luonnon eli maapallon pinnanmuotojen ja materiaalien, sekä niistä koostuvien muodostumien vaihtelua (Tukiainen & Hjort 2021: 55). Gray (2018: 14) puolestaan kertoo termin kuvaavan geologista, geomorfologista, hydrologista sekä maaperän monimuotoisuutta. Serrano ja Ruiz-Flaño (2007: 142) lisäävät vielä topografian tähän listaan omana erillisenä osanaan. Tässä työssä käytetään edellä mainituista määritelmistä monipuolisinta eli Serranon ja Ruiz-Flaño (2007) määritelmää, eli geodiversiteetin osiksi lasketaan topografinen, geologinen, geomorfologinen, hydrologinen ja maaperän vaihtelu. Mittakaava, jossa tätä monimuotoisuutta tarkastellaan, vaihtelee atomitasosta globaaliin skaalaan (Gray 2004: 15; Serrano & Ruiz-Flaño 2007: 140). Erityisesti pienemmässä mittakaavassa esiintyvää geodiversiteettiä ei ole kartoitettu, eikä vielä voidakaan kartoittaa täysin koko maapallon laajuisesti, koska se vaatisi tällä hetkellä saavuttamatonta tietokonekapasiteettia. On myös todennäköistä, että ihmistoiminta tuhoaa osan geodiversiteetistä ennen kuin sitä ehditään edes löytää ja tutkia (Gray 2018: 15).

Tarvittaisiin kokonaisen kirjan verran tilaa, jotta jokainen geodiversiteetin osatekijä, kuten muodostuma, materiaali ja maaperätyyppi, voitaisiin luetella. Siksi tässä esitetäänkin eri kategoriat, joihin elottoman luonnon monimuotoisuuden osat voidaan jakaa. Aiemmin mainitun geodiversiteetin määritelmän antaneet Serrano ja Ruiz-Flaño (2007: 141) ovat luokitelleet geodiversiteetin osat kuvan 1 mukaisesti. Kuvasta nähdään, mitä myöhemmin tässä tutkimuksessa esiteltävät kaukokartoitusmenetelmät voidaan valjastaa tutkimaan.

| | | |
|---------------|------------------------|----------------------|
| Topography | Energy | |
| | Roughness | |
| Geology | Earth materials | Minerals |
| | | Lithology (rocks) |
| | | Superficial deposits |
| | | Fossils |
| | Tectonic | Structures |
| Geomorphology | Morphostructures | |
| | Morphogenetic systems | |
| | Processes | |
| | Erosion landforms | |
| | Accumulation landforms | |
| | Micro-landforms | |
| Hydrology | Water states | Water |
| | | Snow |
| | | Ice |
| | | Glaciers |
| | Hydrologic elements | Oceans |
| | | Seas |
| | | Rivers |
| | | Springs |
| | | Wetlands |
| | | Lakes |
| Soils | Orders | |
| | Suborders | |

Kuva 1. Geodiversiteetin osien luokittelu Serranon ja Ruiz-Flaño (2007) mukaan. Heidän määritelmänsä mukaan geodiversiteettiin sisältyy topografinen, geologinen, geomorfologinen, hydrologinen ja maaperän monimuotoisuus, ja näistä jokainen voidaan jakaa tarkempiin tutkittaviin osiin. (kuva: Serrano & Ruiz-Flaño 2007:114).

Eri geodiversiteetin osien muutokset voivat tapahtua hyvinkin erilaisilla aikaväleillä. Fluviaalisissa muodostumisissa voi tapahtua suuria muutoksia jopa minuuteissa esimerkiksi tulvien seurauksena. Suuret geomorfologiset muutokset, kuten orogeeniset muutokset taas vaativat yleensä tuhansia vuosia (Zarnetske ym. 2019: 553). Kuten myöhemmissä osissa tullaan näkemään, geodiversiteettiä tutkitaan ja sen määrää kvantifioidaan sekä sen näkyviä osia kartoittamalla että niiden syntyhistoriaa ja –aikaa luokittelemalla.

Yksi syy siihen, miksi geodiversiteettiä esiintyy maapallolla, löytyy maapallon syntyhistoriasta. Maapallo on syntynyt, kun alkuaineita ja asteroideja on kerääntynyt yhteen painovoiman ja sattuman ansiosta. Ilmakehän muodostumisen jälkeen meteoriittien törmäykset maapalloon ovat vähentyneet verrattuna aikaan ennen ilmakehää. Maapallon alkuaikoina sen pinta oli sulaa, kuumaa ainesta, joka jäähtyi ja muuttui kiinteäksi maankuoreksi. Kiinteä maankuori jakautuu laattoihin, joiden liike sulan aineksen päällä on osaltaan mukana muodostamassa geodiversiteettiä, vulkaanisen aktiivisuuden, vuorien poimuttumisen ja maankuoren paikoittaisen repeytymisen ansiosta (Gray 2004: 14–21).

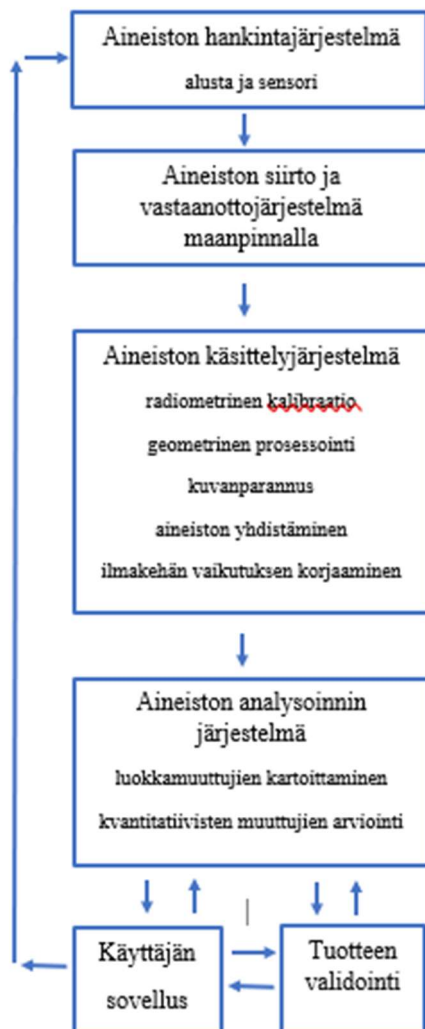
Syntyhistorian lisäksi geodiversiteettiä aiheuttavat maapallon sääilmiöt. Edellä mainitun vuorten poimuttumisen seurauksena ympäristöään korkeammalle kohonnut vuori altistuu tuulen ja sateen aiheuttamalle kulutukselle. Kulutusaines liikkuu painovoiman ansiosta veden tai massaliikuntojen mukana alaspäin ja kasautuu. Otollisissa olosuhteissa tästä kasautuneesta aineksesta voi muodostua sedimenttikiviä (Gray 2004: 28).

Kuluneen aineksen kuljettamisen lisäksi veden vaikutus geodiversiteetin muodostumiseen on nähtävissä myös rannikoilla. Rannikoilla tuulen, myrskyjen ja laattatektoniikan aiheuttama veden liike kuluttaa ja kasaa kiviainesta, muokaten maaperää ja maanpinnanmuotoja. Tuuli voi myös kasata veden kuluttamaa ja kasaamaa ainesta, jolloin muodostuu dyynejä. Dyynejä muodostuu rannikon lisäksi myös aavikoilla (Gray 2004: 57). Vesi vaikuttaa maaperään ja geomorfologisiin prosesseihin myös jäätyessään. Pakkasrapautuminen, jäätiköitymisen ja jäätiköiden sulaminen sekä routaprosessit ovat esimerkkejä tästä jäätyvän veden vaikutuksesta geodiversiteettiin (Gray 2004: 56).

Edellä on kuvattu elotonta alkuperää olevia syitä geodiversiteetin muodostumiselle, mutta niiden lisäksi myös elollinen luonto muokkaa abiottista luontoa ja johtaa sen monimuotoisuuden lisääntymiseen. Grayn (2004: 61) mukaan kasvit ja eläimet aiheuttavat orgaanisen aineksen kasautumista, biokemiallista kulutusta, ravintoaineiden kiertoa, ja maaperän sekoittumista. Vaikutus on hyvin erilainen eri eliöiden elinalueilla, mikä johtaa lähes loputtomaan vaihteluun maaperän ominaisuuksissa.

3 Kaukokartoitus

Kaukokartoituksella tarkoitetaan tutkimusmenetelmää, jossa ei olla fyysisessä kontaktissa tutkittavaan kohteeseen (Uwera 2019: 2). Kaukokartoitusmenetelmä koostuu informaatiota vastaanottavasta sensorista, alustasta, jolla sensori on, tiedon siirto- ja vastaanottojärjestelmistä, tiedon käsittely- ja analyysijärjestelmistä, sekä käyttöjärjestelmästä (kuva 2, Liang & Wang 2019: 2). Tähän listaan Uwera (2019: 4) lisää, että tarvitaan myös kohde, jota kartoitetaan. Riippumatta välineestä tai siihen kytköksissä olevista järjestelmistä, peruseriaate kaukokartoituksessa on yksinkertainen; mitataan kohteesta sensoriin tulevia fotoneita (Emery & Camps 2017: 44).

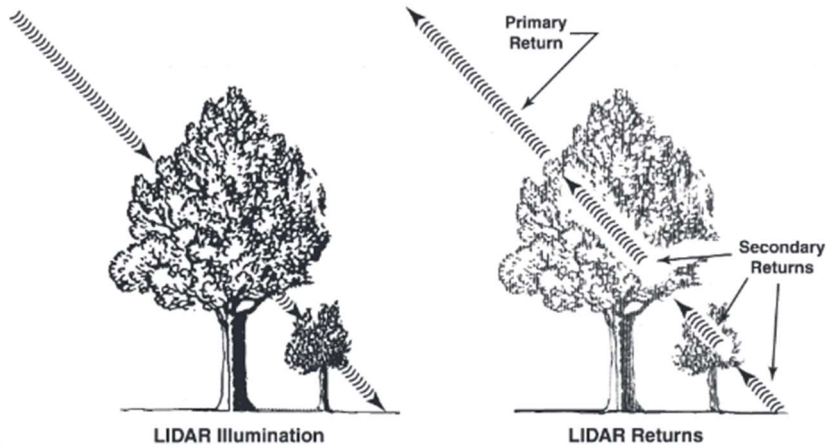


Kuva 2. Kaukokartoitusmenetelmän kaikki osat. Kaukokartoitus alkaa aineiston hankinnasta ja siirtämisestä sensorista vastaanottojärjestelmään. Seuraavana tarvitaan aineiston käsittelyyn ja analyysiin soveltuvia järjestelmiä. Viimeisenä menetelmän osana ovat käyttäjän sovellus tai käyttöjärjestelmä, jossa aineistoa käytetään, ja tuotteen validointi. Kuva Sini Ollila, Liangin ja Wangin (2019: 2) mukaan.

Kaukokartoituksessa käytetyt sensorit voidaan Uweran (2019: 3) mukaan jakaa aktiivisiin ja passiivisiin sensoreihin. Aktiivisilla on oma energianlähteensä ja ne lähettävät säteilyä ja mittaavat sen heijastumista, kun taas passiiviset välineet hyödyntävät muualta, esimerkiksi auringosta, tulevaa säteilyä tai kohteen luovuttamaa lämpösäteilyä. Liang ja Wang (2019: 14–15) listaavat yleisimmät passiiviset sensorit, joihin kuuluvat radiometri sekä kuvantava ja spektroradiometri. Yleisimmät aktiiviset sensorityypit ovat heidän mukaansa Radar (Radio Detection and Ranging), SAR (side-looking radar), InSAR (Interferometric synthetic-aperture radar) ja Lidar (light detection and ranging).

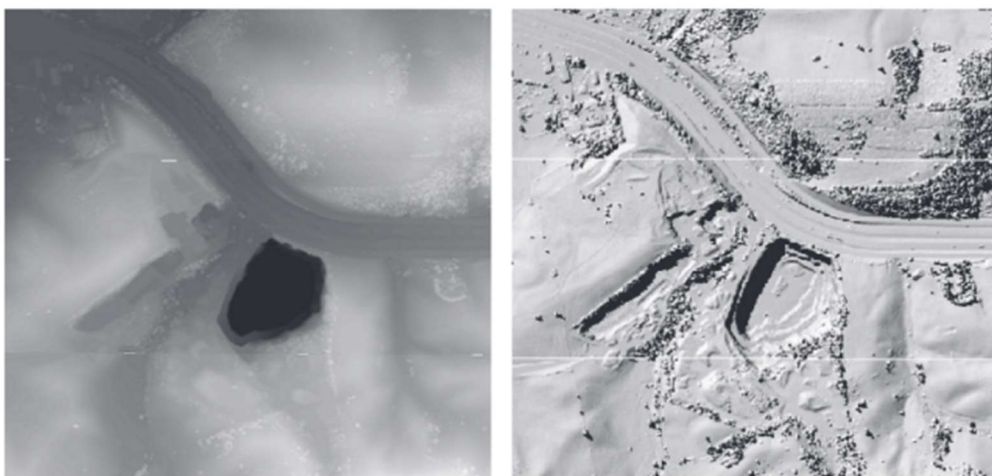
3.1 Light detection and ranging

Light detection and ranging eli Lidar on kaukokartoituksen menetelmä, jossa aktiivinen sensori lähettää lasersäteen eli pulssin kohti maata ja mittaa ajan, joka kuluu säteen heijastumiseen takaisin sensoriin (Emery & Camps 2017: 115). Tieto takaisin heijastuvasta säteestä yhdistetään GPS-tietoon, ja yhdessä aika- ja paikkatiedosta voidaan muodostaa kuva maaston korkeudesta (Campbell & Wynne 2011: 246). Sensori voi olla ilmakehässä, esimerkiksi lentokoneeseen kiinnitettynä, tai ilmakehän ulkopuolella satelliitissa (Mudd 2020: 94). Koska käytössä on nimennomaan lasersäde, joka muodostuu kapeasta aallonpituusalueesta, se kulkee pitkiäkin matkoja suoraan ja mahdollistaa siksi tarkan mittauksen (Campbell & Wynne 2011: 243). Lidar-menetelmä tuottaa rasterimuotoisen pistepilven, jossa jokaisella pisteellä on korkeusarvo. Takaisin heijastuvia säteitä kutsutaan palautuksiksi, ja niitä voi olla useita jokaista lähetettyä pulssia kohden esimerkiksi puun latvasta, aluskasvillisuudesta ja maanpinnasta. Kuten kuvasta 3 voi nähdä, ensimmäinen palautus pulssille tulee yleensä kasvillisuuden korkeimmasta osasta. Osa pulssista pääsee kasvillisuuden sisempiin osiin ja heijastuu lehdistä tai oksista, ja osa pulssista palautuu maanpinnasta.



Kuva 3. Yksi Lidar-pulssi voi saada useita palautuksia. Näistä ensimmäinen tulee usein kasvien latvoista. Viimeinen palautus tulee maanpinnasta. (kuva: Campbell & Wynne 2011)

Jotta Lidar-aineisto olisi käyttökelpoista esimerkiksi tutkimuksessa, aineistoa täytyy prosessoida. Usein Lidar-aineistosta muodostetaan surface elevation model (SEM), joka kuvaa ensimmäisiä palautuksia eli rakennusten, kasvillisuuden ja maanpinnan korkeimpia kohtia (Campbell & Wynne 2011: 249). Tämän lisäksi tehdään digital elevation model (DEM), joka kuvaa viimeistä palautusta eli maanpinnan korkeutta, kun kasvillisuuden ja rakennusten vaikutus on poistettu aineistosta. Aineistosta voidaan laskea myös kasvillisuuden korkeus. Lidar-aineistosta voidaan muodostaa harmaasävykuva, jossa palautusten etäisyys ilmaistaan tummuusasteella. Kuvassa 4 vasemmalla nähdään, että kyseinen kuva ei ole kuitenkaan visuaalisesti yhtä informatiivinen kuin oikealla oleva kuva. Oikealla sama data on käsitelty hill shade -työkalulla, joka näyttää maaston tekstuuriin ja on ihmissilmälle selkeämpi. Muitakin työkaluja ja väri vaihtoehtoja voidaan käyttää Lidar-aineiston käsittelyyn.



Kuva 4. Lidar-aineistosta muodostettu kuva vaatii usein käsittelyä ollakseen informatiivinen. Vasemmalla Lidar-aineisto Wythevillestä Virginian osavaltiosta harmaasävykuvana. Oikealla sama aineisto hill shade -työkalulla käsiteltynä, jolloin kuvasta voi erottaa esimerkiksi maanpinnanmuotoja, rakennettua ympäristöä ja kasvillisuutta. (kuva: Campbell & Wynne 2011)

Aineiston tarkkuus voidaan usein laskea kymmenissä senttimetreissä, ja se tulisi ilmaista aineiston yhteydessä. Tarkkuus lasketaan sekä horisontaalisesti että vertikaalisesti, eli maanpinnan suuntaisesti ja korkeussuunnassa (Campbell & Wynne 2011:250). Kuten Lidar-aineistoja hyödyntäneistä tutkimuksista kertovassa kappaleessa tullaan näkemään, tarkkuus tähän työhön valikoituneissa tutkimuksissa on välillä 15 cm ja 1 m. Tarkkuutta voidaan arvioida ja parantaa vertaamalla Lidar-aineistoa toiseen aineistoon. Esimerkkinä tästä on Lidar-aineiston pohjalta muodostetun DEM-mallin vertaaminen toisen lähteen avulla muodostettuun DEM-malliin samalta alueelta. Useat tutkimukset hyödyntävätkin useita eri lähteitä, ja näistä nähdään myöhemmin esimerkkejä.

3.2 Multispektraaliset sensorit

Kaukokartoituksessa käytettävät sensorit voivat mitata sähkömagneettista säteilyä muultakin kuin näkyvän valon alueelta (Milodowski ym. 2020: 138). Multispektraaliset sensorit jakavat nämä aallonpituusalueet korkeintaan muutamaa kymmeneen kanavaan. Yleisimmin käytetyt multispektraaliset sensorit ovat kytkettyinä satelliitteihin, kuten Landsat-satelliitteihin. Sensorit mittaavat maan pinnasta heijastuvaa auringon säteilyä, ja tähän säteilyyn kuuluvat sekä näkyvä valo että infrapunasäteily (Campbell & Wynne 2011: 170). Mittauksesta syntyy jokaista kanavaa kohden yksi harmaasävyinen pikseleistä muodostuva kuva. Kuva on alkuun suorakulmainen, mutta kun data korjataan ottamaan huomioon satelliitin liike ja Maan pyöriminen, kuvasta tulee vinosuunnikkaan muotoinen. Kukin kanavista korostaa eri asioita maastossa. Eri kanavien kuvista voi muodostaa yhden kuvan, jossa eri värit kuvaavat eri kanavia. Esimerkkinä tästä on väärävärikuva (kuva 5), johon otetaan mukaan vihreää ja punaista valoa sekä infrapunasäteilyä mitanneet kanavat. Infrapunasäteily kuvataan väärävärivärikuvasa punaisella, punaista valoa mittaava kanava vihreällä värillä ja vihreää valoa mittaava kanava sinisellä värillä. Tällöin elävä kasvillisuus näyttäytyy kirkkaana punaisena, samaa vesi sinisenä ja rakennukset harmaina (Campbell & Wynne 2011:172). Monia muitakin yhdistelmiä on, ja mitä useampi kanava on käytössä, sitä tarkemmin niitä yhdistelemällä voidaan kuvata eri maaston ja maan pinnan ominaisuuksia.



Kuva 5. Multispektraalisen aineiston kolmesta kanavasta koostettu väärävärikuva Hailuodosta. Metsät, suot, kasvillisuuden peittämät dyynit ja pellot näkyvät kuvassa punaisen eri sävyissä. Sinisenä näkyvät alueet ovat paljaita dyynejä ja vähän kasvillisuutta sisältäviä alueita. (Kuvamuokkaus Sini Ollila, aineistona Landsat 4-satelliittikuvat US Geological Survey:lta)

Useiden multispektraalisten sensoreiden aineistoja on saatavilla käyttöön ilmaiseksi, kuten kuvan 5 tuottamiseen käytetyt Landsat-aineistot. Aineistoja voi käsitellä haluamallaan tavalla paikkatieto-ohjelmistojen avulla. Jotkin paikkatieto-ohjelmistot ovat myös ilmaisia. Muutaman kanavan yhden kuvan kokoisten aineistojen käsittely ei vaadi tietokoneelta suurta kapasiteettia, mutta vaatimukset nousevat nopeasti tutkittavan alueen koon kasvaessa. Multispektraalisiin aineistoihin perustuvaa tutkimusta on siis mahdollista tehdä hyvin pienilläkin resursseilla.

3.3 Hyperspektraaliset sensorit

Toisin kuin multispektraaliset sensorit, jotka tuottavat tietoa korkeintaan kymmeniltä kanavilta, hyperspektraaliset sensorit voivat tuottaa 200 tai yli kanavaa (Campbell & Wynne 2011: 429). Mittausmenetelmä on lähellä multispektraalisten sensorien toimintaa. Mittaustulokset ovat kuitenkin tarkempia ja ne jaetaan paljon kapeampiin aallonpituusalueisiin ja siten kanavien lukumäärä on suurempi. Tämä yksityiskohtaisuus ja tarkkuus mahdollistaa sellaisten ilmiöiden tutkimisen, joita muilla kaukokartoituksen menetelmillä ei olisi mahdollista tutkia. Tarkkuus riittää esimerkiksi kasvien klorofylli-, ligniini- ja typpipitoisuuksien mittaamiseen ja yksittäisten mineraalien pitoisuuksien muutosten tarkasteluun maaperässä. Hyperspektraalisten sensorien

käyttö edellyttää niiden tarkkuudesta ja yksityiskohtaisuudesta johtuen usein suuren datamäärän prosessointia (Campbell & Wynne 2011: 439).

Hyperspektraalinen sensori voi olla satelliitin yhteydessä, kuten Hyperion-sensori NASAn EO-1 –satelliitissa, tai esimerkiksi droneen kiinnitettynä. Aineiston käsittelyä varten tarvitaan hyperspektraalisen kuvantamisen asiantuntijuutta, jotta relevanttia tietoa sisältävän kanavan valinta on mahdollista. Joitain hyperspektraalisia aineistoja on saatavilla tutkimus- ja muuhun käyttöön ilmaiseksi, esimerkiksi Hyperionin keräämä aineisto löytyy Earth Explorer –palvelusta.

4 Kaukokartoitusmenetelmien käyttö geodiversiteetin kartoittamisessa

Geodiversiteetin kartoittamisessa voidaan hyödyntää lukuisia eri kaukokartoitusmenetelmiä valokuvista maanpinnalta käsin tehtävään maanmittaukseen. Tähän tutkielmaan valitut kolme menetelmää sallivat geodiversiteetin elementtien tutkimisen eri skaaloilla mineraalitasosta globaaliin skaalaan. Siksi ne muodostavat monipuolisen yhdistelmän tässä työssä tarkasteltavaksi.

4.1 Lidar-menetelmä geodiversiteetin kartoituksessa

Lidar-menetelmää käytetään geodiversiteetin osatekijöiden tutkimisessa kenties eniten kaikista kaukokartoitusmenetelmistä (Lausch ym. 2020: 13). Sitä hyödynnetään erityisesti topografian kartoittamisessa ja DEM-mallien luomisessa.

Topografiatiedosta voidaan laskea muita arvoja, kuten Cao ja Sofia (2020) tutkimuksessaan tekivät. He tutkivat ihmistoiminnan vaikutusta geomorfologiaan koillis-Italiassa yhdistämällä Lidar-aineistosta tehdyn korkeusmallin pohjalta laskettuja *slope*, *mean curvature* ja *surface peak curvature* –lukemia ja maankäyttöaineistoa. He jatkoivat analyysiä laskemalla em. muuttujien frekvenssit tutkimusruuduilla, ja saivat siten tuloksena esimerkiksi rinnejyrkkyyksien jakautumisen tutkimusalueella.

Orlandinin ym. (2011) tutkimuksessa Lidar-menetelmää hyödynnettiin *channel headien* muodostumisen ennustamiseen dolomiiteilla. Tutkimuksessa Lidar-aineisto kerättiin helikopterista ja se sisälsi viisi pistettä/m², joista saatiin jopa neljä takaisinheijastumaa. Lidar-pisteiden takaisinheijastumat jaettiin kasvillisuudesta ja maanpinnasta tuleviin Terrascan-ohjelmiston avulla. Maanpinnasta tulevien takaisinheijastumien perusteella muodostettiin DEM-

malli 1 m resoluutiolla, jonka perusteella tehtiin karkeampi DEM-malli. Näitä malleja verrattiin kenttätutkimukseen ja huomattiin mallien ennustavan hyvin pintavesien virtausten reittejä.

Ferrer-Valero ym. (2019) tutkivat Kanariansaarten geomorfologiaa, tarkemmin ottaen eri-ikäisten saarien rannikoiden maanpinnan muotoja. Tutkimuksessa yhdistettiin Lidar-aineistoon ortoilmakuvia, geologisia ja kasvillisuuskarttoja. Lisäksi aineistona käytettiin kenttätutkimusta. Lidar-aineiston pistepilvet olivat resoluutiolla 0,5 pistettä/ m².

Lidar-aineistoja hyödynsivät myös McKean ja Roering (2004) kartoittaessaan maanvyörymien esiintymistä ja maanpinnan morfologiaa Uudessa-Seelannissa. Lidar-pistepilven tiheys oli aiempia tässä käsiteltyjä tutkimuksia harvempi, yksi piste 2,6 metrin välein. He kuvaavat, kuinka Lidar-aineistoissa yleinen pieni (+/- 15 cm) virhe vertikaalisessa mittauksessa voidaan korjata joko manuaalisesti muihin aineistoihin vertaamalla tai lentämällä suorassa kulmassa mittaussuuntiin nähden. McKeanin ja Roeringin menetelmä perustuu oletukselle, että maanvyörymien pinta on karkeampi kuin rinteiden, joissa maanvyörymää ei ole. He laskivat Lidar-aineiston pohjalta tehdystä DEM-mallista *slope ja aspectin*. He vaihtelivat tutkimusruudun kokoa 0,5 ja 5 metrin välillä.

Lidar-menetelmää käyttivät myös Lucieer ja Stein (2005) sekä Lucieer ym. (2005) tutkiessaan Englannin luoteisrannikon dyynimuodostumia. Tutkimuksissa Lidar-aineisto oli saatavilla 2 metrin resoluutiolla. Molemmissa tutkimuksissa Lidar-aineisto käsiteltiin Local Binary Pattern Operator (LBP) -menetelmällä. Menetelmän ansiosta eri muodostumat voidaan erottaa toisistaan ja eri alueista muodostetaan yksiköitä niin kutsutun tekstuurin perusteella. Tekstuurilla tarkoitetaan tässä pikselien välistä tilallista korrelaatiota. Menetelmä tuottaa kuitenkin jonkin verran epätarkkuutta tuloksiin. Tarkkuus oli 85,59 % (Lucieer & Stein 2005: 266). Etuna oli kuitenkin se, että menetelmä on automatisoitu eikä vaadi tutkijalta manuaalista työtä. Tulos on myös objektiivinen. Seuraavaksi askeleeksi tutkijat ehdottavat yksiköiden luokittelua muun muassa tekstuurin, korkeuden ja muodon perusteella.

Dyynejä tutkivat Lidar-aineiston avulla myös Mitasova ym. (2005). Heidän tutkimuksensa käsitteli Yhdysvaltojen Pohjois-Carolinan osavaltiossa sijaitsevaa aktiivista dyynikenttää. Käytössä oli kaksi eri Lidar-aineistoa. Ensimmäinen kerättiin ilmakuvausena 2300 metrin korkeudesta, ja sen vertikaalinen tarkkuus oli 20 cm ja horisontaalinen tarkkuus 2 m, mittauspisteitä oli 1 per 3 m. Toinen aineisto kerättiin 700 metrin korkeudesta ja vertikaalinen tarkkuus oli 15 cm ja horisontaalinen 80 cm. Toisen aineiston kohdalla vain ensimmäistä palautusta käytettiin tutkimuksessa. Aineisto ei siten kuvannut maanpinnan korkeutta, vaan kasvillisuuden ja rakennusten korkeutta siellä, missä niitä oli. Ensimmäiseen aineistoon sisällytettiin useita palautuksia, ja siten se kuvasi maanpinnan korkeutta. Lidar-aineistojen lisäksi tutkijoiden

käytössä oli myös ilmakuvia ja valokuvia sekä digitaalinen korkeusaineisto. Lidar-aineistoista muodostettiin DEM-malli, jonka oikeellisuus arvioitiin valitsemalla tutkimusalueelta 40 paikkaa, joissa käytiin paikan päällä mittaamassa korkeus, ja näitä arvoja verrattiin DEM-malliin.

Myös Barbarella ym. (2019) käyttivät Lidar-menetelmää tutkimuksessaan, joka sijoitui Italian kivikkoisille ja jyrkille rannikoille, joissa in situ –tutkimus, eli paikan päällä tehtävä tutkimus on haastavaa. Heidän tutkimuksensa perustui yhdistelmälle topografisia karttoja ja ilmakuvia sekä Lidar-aineistolle. Mittauspisteitä oli 1,5 neliömetrille, tarkkuus oli 30 cm vaakatasossa ja 15 cm korkeussuuntaan. Lisäksi aineistona käytettiin satelliittikuvia. Satelliittikuvista ja Lidar-aineistosta muodostettiin omat DEM-mallinsa, joiden tarkkuudet arvioitiin. Heidän mukaansa eri aineiston perusteella tehtyjen DEM-mallien vertailu voi olla hyödyllistä, jotta mittausvirheitä ei erehdytä luulemaan maanpinnassa tapahtuviksi geomorfologiseksi muutoksiksi. Lidar-dataan perustuvat DEM-mallit ja kartat olivat heidän tutkimuksessaan tarkempia kuin satelliittikuviin perustuvat.

4.2 Multispektraaliset sensorit geodiversiteetin kartoituksessa

Kaukokartoituksen kentällä kenties hyödynnetyimmät multispektraaliset sensorit ovat Landsat, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), Modis ja SENTINEL- satelliitteihin kiinnitetyt sensorit (Lausch ym. 2020). Multispektraalisten sensoreiden tuottamalla aineistolla on lukuisia käyttötarkoituksia geodiversiteetin osia kartoitettaessa.

Eoliset muodostumat ovat luonteeltaan muuttuvia, ja niiden merkitys kasvaa jatkuvasti ihmistoiminnan aiheuttaessa aavikoitumista eri puolilla maapalloa (Lausch ym. 2020: 18). On erittäin hyödyllistä pystyä tutkimaan eolisia muodostumia laajemmassa mittakaavassa, kuin mitä in situ –tutkimukset mahdollistavat. Kaukokartoitus mahdollistaa tämän laajan mittakaavan, sekä pitkän aikavälin tarkastelun (Zheng ym. 2022). Näiden muodostumien kartoittamiseen multispektraalisten sensorien tuottamasta aineistosta on eri tapoja. Tutkija voi joko itse visuaalisesti tutkia aineistosta muodostettuja kuvia, tai käyttöön voidaan ottaa tietokone esimerkiksi koneoppimisen muodossa. Jälkimmäistä vaihtoehtoa tutkivat Chowdhury ym. (2010). Heidän mukaansa dyynimuodostumia on mahdollista tutkia pelkän multispektraalisen aineiston ja sitä analysoivan algoritmin avulla, jos käytössä on validoitu valmisteluaineisto, johon analyysi perustetaan ennen varsinaisen tutkimusaineiston käyttöä. Multispektraalisen aineiston myötä mahdollistui myös eri dyynityyppien erottaminen toisistaan, minkä Zheng ym. (2022) nostavat esille erityisenä haasteena eolisia muodostumia tutkittaessa. Tämä johtui siitä, että

multispektraalisesta aineistosta pystyi analysoimaan muodostumien tekstruurin ja luokittelemaan muodostumat sen perusteella.

Toinen jatkuvan muutoksen alainen geodiversiteetin osatekijä, jota voidaan kartoittaa multispektraalisella aineistolla, on pintavedet (Lausch ym. 2022: 20). Esimerkki tällaisesta tutkimuksesta on Pekelin ym. (2016) tekemä globaalinen mittakaavan tutkimus pintavesien muutoksista 32 vuoden aikavälillä. He käyttivät päätähuimaavaa kolmea miljoonaa multispektraalista satelliittikuvaa, jotka olivat peräisin Landsat 5, 7 ja 8 –satelliittien tuottamista aineistoista. Jotuen aineiston koosta, heidän täytyi ottaa käyttöön “big datan” analysointiin kehitettyjä metodeja. Käytetty ohjelmisto toimii Google Earth Enginen kautta. Heidän aineistonsa ja tutkimuksensa tuotos on vapaasti käytettävissä (Global Surface Water Explorer) ja toimii esimerkkinä multispektraalisten sensorien hyödyistä geodiversiteetin osatekijöitä kartoitettaessa.

Mielke ym. (2014) hyödynsivät muun muassa Landsat-8 –aineistoa tutkiessaan eri malmien esiintymistä Etelä-Afrikan ja Namibian rajalla. Vaikka tutkimus liittyikin malminetsintään, on se kiinnostava myös geodiversiteetin tutkimisen kannalta. Samoilla menetelmillä voidaan tutkia geodiversiteettiä pienimmässä mittakaavassa eli mineraalitasolla. Tutkimuksessa kartoitettiin raudan esiintymistä maaperässä, johon Landsat-8:n Operational Land Imager eli OLI soveltui tutkimuksen mukaan hyvin. OLI tuottaa 9-kanavaisen aineiston 30 metrin resoluutiolla. Tutkimuksessa yhdistettiin multispektraalista ja hyperspektraalista aineistoa. Multispektraalisella aineistolla saatiin karkeampaa tietoa tutkimusalueesta, ja sen perusteella valittiin alueet, joihin hyperspektraalisen aineiston käyttö voitiin kohdentaa tarkemmin. Tutkimuksen hyperspektraalisen aineiston hyödyntämisestä kerrotaan lisää seuraavassa osiossa.

Sekä multi- että hyperspektraalista aineistoa hyödynsivät myös Gomez ym. (2018) tutkiessaan maan pintamateriaaleja, erityisesti savipitoisuuden osalta. Kuten edellä käsitellyssä tutkimuksessa, myös tässä tutkijat hyödynsivät Landsat-8:n OLI-sensoria ja sen lisäksi SENTINEL-2 Multispectral Sensor Instrument:ia (MSI) sekä ASTER-aineistoa. Heidän tutkimusalueenaan oli Cap Bonin alue pohjois-Tunisiassa. Heidän tutkimuksessaan ASTER ja MSI tuottivat tarkempia tuloksia maaperän savipitoisuudesta kuin OLI. Tutkimuksen toisessa vaiheessa huomattiin kuitenkin, että epätarkkuuksia esiintyi myös hyödynnettäessä MSI:stä saatavaa aineistoa maaperän savipitoisuuden tarkasteluun. Siten tähän tarkoitukseen soveltui vain ASTER:n tuottama aineisto. He selittävät tuloksen sillä, että ASTER:ssa on kolme kanavaa, jotka mittaavat saven esiintymiseen liittyvää tekijää. OLI:ssa ja MSI:ssä samaa tekijää mittaa vain yksi kanava.

4.3 Hyperspektraaliset sensorit geodiversiteetin kartoituksessa

Aiemmassa kappaleessa kuvattu Lucieerin ym. (2005) tutkimus Englannin luoteisrannikon dyynimuodostumista hyödynsi Lidar-menetelmän lisäksi myös hyperspektraalisten sensorien tuottamaa aineistoa. He kuitenkin käyttivät tutkimuksessaan vain yhden kanavan tuottamaa kuvaa. He valitsivat lähi-infrapuna kuvavaan kanavan saadakseen tietoa maanpeitteestä 6 km²:n kokoiselta tutkimusalueeltaan. Resoluutiota pienennettiin yhdestä metristä kahteen metriin, jotta aineisto sopisi yhteen käytetyn Lidar-aineiston kanssa. Yhdessä hyperspektraalisen sensorin tuottaman yhden kanavan aineiston kanssa käytettiin myös kenttätutkimusta validoimaan tuloksia. Epävarmuusarvot vaihtelivat 0.1 ja jopa 0.95 välillä. He päätyvätkin ehdottamaan useampien kanavien hyödyntämistä tulevissa tutkimuksissa epävarmuuden vähentämiseksi.

Myös multispektraalista aineistoa hyödyntäneet Mielke ym. (2004) yhdistivät tutkimukseensa myös hyperspektraalisten sensorien hyödyntämisen. Kuten aiemmin mainittiin, tutkimus koski rautamalmin esiintymistä Etelä-Afrikan ja Namibian rajan tuntumassa. Hyperspektraalisista sensoreista käytössä olivat Hyperion ja EnMAP. Tutkimuksessa todetaan, että hyperspektraalisen aineiston käytön hyödyt tulevat esiin erityisesti, kun niitä tarkastellaan yhdessä multispektraalisten sensorien tuottamien aineistojen kanssa. Hyperspektraalisten sensorien keräämät aineistot käsiteltiin tutkimuksessa erityisesti maanpinnan materiaalien tunnistamiseen kehitetyllä ohjelmistolla. Tuloksena oli yhä tarkempaa tietoa kohteista, joihin voitaisiin kohdistaa lisää datankeruuta droneen tai lentokoneeseen kiinnitetyllä hyperspektraalisella sensorilla. Geodiversiteetin tutkimisen kontekstissa kyseiset jatkotutkimukset eivät välttämättä olisi tarkoituksenmukaisia, vaan todennäköisesti tyydyttäisiin hyperspektraalisen sensorin tuottaman aineiston käsittelyyn ohjelmiston avulla.

Kuten edellä, myös Gomez ym. (2018) sisällyttivät tutkimukseensa sekä multi- että hyperspektraalisten sensorien hyödyntämisen. Kuten edellisessä osiossa kuvattiin, heidän tutkimusalueensa oli pohjois-Tunisiassa, ja tutkimus koski maan savipitoisuuden mallintamista multi- ja hyperspektraalisten sensorien avulla. Hyperspektraalisista sensoreista tutkimuksessa hyödynnettiin AISA-DUAL –sensoria. Saadun aineiston spatiaalinen resoluutio oli 5 m. Tutkimuksessa ei selvitetty kuinka tarkkaan AISA-DUAL:n avulla voidaan kartoittaa maan savipitoisuutta. Sen sijaan AISA-DUAL-aineistoon verrattiin multispektraalisten sensoreiden tuottamia aineistoja ja siten selvitettiin eri multispektraalisten aineistojen tarkkuutta. Käytössä olleen hyperspektraalisen datan oletettiin siis olevan tarkkaa ja kuvaavaa.

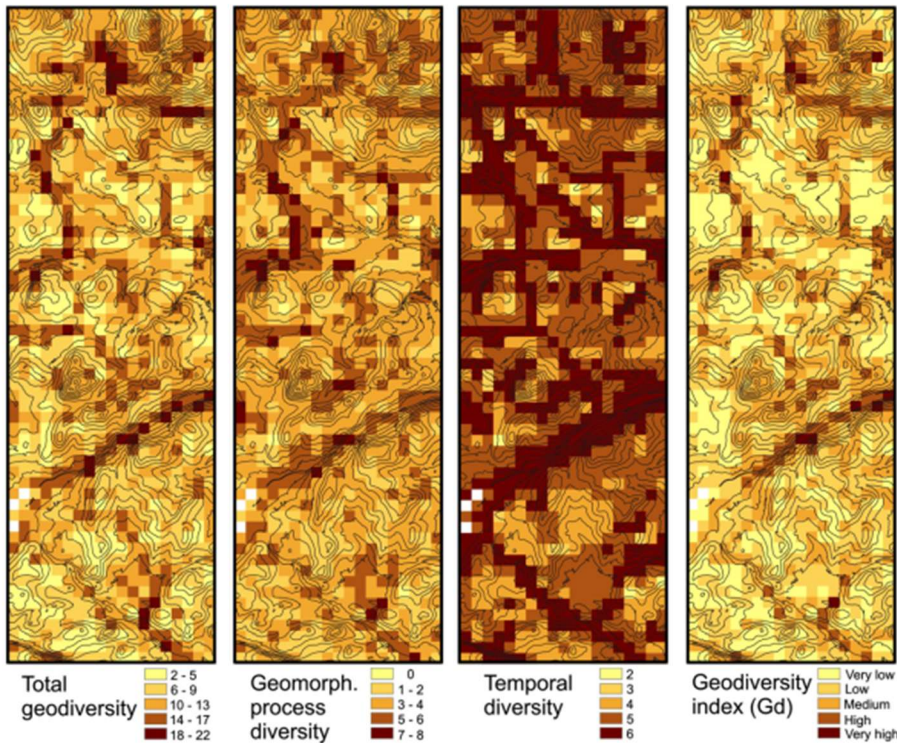
Koska hyperspektraalisten sensorien tuottama aineisto ei ole sellaisenaan valmista hyödynnettäväksi esimerkiksi edellä mainittujen maanpinnan muotojen ja materiaalien

tutkimisessa, avuksi on kehitetty erilaisia ohjelmistoja. Yksi näistä on Tetracorder, jota Clark ym. (2003) kuvaavat artikkelissaan. Ohjelmiston prosessi on monivaiheinen, ja se tekee maa-lajien analysoinnista kvantitatiivisempaa ja nopeampaa, kuin jos vaiheet jouduttaisiin toteutta-maan yksi kerrallaan. Ohjelmiston käyttäjältä vaaditaan kuitenkin asiantuntemusta, jotta ohjel-miston käyttö on luotettavaa. Ohjelmiston käyttötarkoituksia ovat monet geodiversiteettiin vä-lillisesti liittyvät tutkimukset, kuten maaperän mineraalikoostumuksen ja hylätyistä kaivoksista koituvien päästöjen paikantaminen, jonka perusteella voidaan kohdentaa ympäristönsuojelu-työtä. Myös pintavesien saastumisen lähteitä voidaan tutkia. Kiinnostava geodiversiteettiin liit-tyvä käyttökohde on myös muiden planeettojen pintamateriaalien ja pinnanmuotojen tutkimus.

4.4 Geodiversiteetin laskeminen kaukokartoitusaineistosta

Edellisissä kappaleissa tuli esille, miten geodiversiteetin eri osia voidaan paikantaa, luokitella ja tutkia eri kaukokartoitusmenetelmillä. Alueen geodiversiteetin selvittäminen voi vielä sisäl-tää näiden geodiversiteetin osien laskemisen yhteen, jotta voidaan kvantifioida abioottisen vaihtelun määrä tutkittavalla alueella. Tähän yhteenvetoon on eri tutkimuksissa käytetty erilai-sia laskukaavoja, joista seuraavaksi esitellään muutama.

Tutkimuksessaan pohjoisen Suomen geodiversiteetistä Hjort ja Luoto (2009) loivat tutkimusalueestaan 500 m x 500 m kokoiset tutkimusruudukot. Jokaista ruutua kohden lasket-tiin ensiksi geodiversiteetin osatekijöiden lukumäärä. Toiseksi juuri lasketut osat luokiteltiin syntytapansa mukaan, jotta jokaiselle ruudulle voitiin laskea geomorfologisten prosessien vaih-televuuden määrä. Kolmanneksi osatekijät luokiteltiin syntyajan mukaan, jotta ruuduille saatiin ajallisen vaihtelun määre. Viimeisenä he käyttivät Serranon ja Ruiz-Flañon (2007: 144) lasku-kaavaa $G_d = E_g \times R / L_n \times S$, missä G_d on geodiversiteetti-indeksi, E_g on ensimmäisessä vai-heessa laskettu geodiversiteetin osatekijöiden lukumäärä, L_n on logaritmiarvo ja S on ruudun pinta-ala. Eri vaiheista saadut tulokset voidaan luokitella tai esittää numeerisesti, ja nämä tu-lokset voidaan esittää visuaalisesti kuten kuvassa 6.



Kuva 6. Tutkimusruudulla esiintyvä geodiversiteetti voidaan kvantifioida ja esittää visuaalisesti. Kuivissa geodiversiteetin osatekijöiden, eri geomorfologisten prosessien ja geodiversiteetin osien syntyajankohtien lukumäärät sekä geodiversiteetti-indeksit tutkimusruutuja kohden Hjortin ja Luodon (2009) tutkimusalueella Pohjois-Suomessa. (kuva Hjort & Luoto 2009: 113)

On lukuisia muitakin tapoja kvantifioida geodiversiteettiä kaukokartoitusaineiston perusteella (esim. Ruban 2010; Argyriou ym. 2016). Usein ne perustuvat erilaisten indeksien laskemiselle kuten edellä kuvatussa tutkimuksessa. Osa yleisesti käytetyistä indekseistä, kuten Argyrioun ym (2016) ja Manosson ym. (2021) käyttämät Shannon's Diversity Index ja Simpson's Diversity Index, on kehitetty eliölajien monimuotoisuuden kvantifioimiseen. Niitä käytetään yleisesti biodiversiteettiä tutkittaessa. Manosso ym. (2021: 9) tuovatkin esiin, että samojen indeksien käyttö geo- ja biodiversiteettitutkimuksessa edistää niiden välisen yhteyden tutkimista. Kuten Crisp ym. (2020: 535) toteavat, olisi hyödyllistä kehittää yhteneväisiä käytäntöjä geodiversiteetin kvantifioimiseen ja geodiversiteetin laskemiseen käytettyjen indeksien valintaan.

5 Pohdinta

Kuten edellä nähtiin, kaukokartoitusmenetelmät voivat olla hyvin käyttökelpoisia geodiversiteetin tutkimisessa. Niiden käytössä on selkeitä hyötyjä in situ –tutkimukseen verrattuna, mutta myös joitain haasteita, jotka täytyy pitää mielessä tutkimuksia tarkasteltaessa ja tulevia

tutkimuksia suunniteltaessa. Tulevaisuudessa kaukokartoitusmenetelmät tarjoavat kuitenkin vielä lisää mahdollisuuksia elottoman luonnon tutkimiseen.

5.1 Haasteet

Yksi yleisimmistä kaukokartoitusmenetelmien käytön yhteydessä mainituista haasteista liittyy eri kaukokartoitusaineistojen yhdistämiseen keskenään. Eri aineistojen spatiaaliset ja ajalliset resoluutiot eivät välttämättä sovi yhteen eri aineistoissa (Zarnetske ym. 2019: 552). Tämä vaikeuttaa eri aineistojen yhdistämistä, jota tarvitaan esimerkiksi tehtäessä pitkän aikavälin tarkastelua yhdellä alueella tai eri alueiden vertailua. Kwokin (2018: 2) mukaan aineistoja onkin usein kerätty lyhyiltä aikaväleiltä esimerkiksi satelliittimissioiden lyhyiden toiminta-aikojen takia. Tämä lisää tarvetta yhdistellä eri aineistoja.

Toinen haaste kaukokartoitusaineistojen käytössä on suuren aineistomäärän säilyttäminen ja käsittely. Erityisesti erittäin tarkka tai laaja aineisto vaatii paljon tietokoneen prosessointikyvyiltä sekä tutkijan asiantuntijuudelta. Zarnetske ym. (2018: 554) toteavat, että niin sanotun big datan käyttö voi olla haastavaa. Lisäksi he kuvaavat, että vaikka tunnetuimmat kaukokartoitusaineistot kuten Landsat-aineistot voivat olla tutkijoille tuttuja, jotkin erittäin hyödyllisistä aineistoista ovat vähemmän tunnettuja ja vähän hyödynnettyjä. Esimerkkeinä näistä vähän hyödynnetyistä aineistoista he listaavat GRACE, SMAP ja Hyperion -aineistot (Zarnetske ym. 2019: 554).

Aineistojen käytön haasteiden lisäksi yksi mahdollinen haaste piilee tutkimusmenetelmien yksipuolisuudessa. Pelkän kaukokartoitusaineiston käyttäminen ilman kenttätutkimusta voi johtaa vääristyneisiin tuloksiin. Lucieer ym. (2005) kuvaavat, kuinka pelkän korkeusmallin perusteella tehty geomorfologisten muodostumien luokittelu voi johtaa muodostumien väärin luokitukseen. Esimerkkinä he käyttävät dyynien ympäristöä. Dyynin takana oleva matala alue voi pelkän korkeuden perusteella tulla luokitelluksi rannaksi, vaikka se todellisuudessa olisi deflaatiopinta. Tutkimuksissa olisikin kaukokartoitusdatan lisäksi käytettävä kontekstuaalista tietoa ja muuta paikkatietoa.

Myös muun paikallisen tiedon yhdistämisessä kaukokartoitusdataan voi olla ongelmia. Lucieer ja Stein (2005) tutkivat rannikkomuodostumia. Rannikoiden muodostumat voivat muuttua joskus nopeastikin esimerkiksi äärimmäisten sääolojen johdosta. Lucieerin ja Steinin tutkimuksessa Englannin luoteisrannikolla tutkijoiden oli vaikeaa yhdistää uusinta ja tarkinta kaukokartoituksella hankittua korkeusmallia aiemmin tehtyihin karttoihin. Karttojen tekemisen jälkeen muodostumat olivat muuttuneet, eivätkä aineistot siten vastanneet kaikilta kohdin

toisiaan. Haasteena heillä oli myös se, että muodostumien rajat eivät aina ole selkeitä. Tämä voi hankaloittaa luokitusten tekemistä entisestään.

Eryisesti hyperspektraalisen kaukokartoituksen kehityskohteiksi Goetz (2009) kuvaa omasta näkökulmastaan muutaman asian. Hänen mukaansa tarvitaan lisää koulutusta kaukokartoituksen alalla ja erityisesti hyperspektraalisen aineiston osalta, jotta menetelmä tulee useammille tutkijoille tutuksi ja käyttökelpoiseksi työvälineeksi. Toisekseen hän kertoo tarpeesta kehittää sensoreita ja tietokoneita, tehokkaamman ja tarkemman työskentelyn sallimiseksi. Van der Meer ym. (2012: 123) lisäävät tähän listaan vielä yhden haasteen. Heidän mukaansa riittävän hyvälaatuisen datan saaminen sadoilta kanavilta vaatii kehittyntä ja tehokasta välineistöä. Tämä on haaste erityisesti avaruudesta tapahtuvalle kuvantamiselle.

Vaikka käytössä olisi valmis ohjelma, joka tunnistaa esimerkiksi maanpinnan materiaalit hyperspektraalisesta aineistosta, voidaan silti kohdata haasteita. Esimerkkinä voidaan käyttää Tetracorder-ohjelman käytössä esiintyviä haasteita. Clark ym. (2003) kuvaavat, kuinka haasteena ovat erilaiset materiaalit, jotka esiintyvät samalla spektraalisella alueella. Tällaisissa tilanteissa algoritmi päätyy aiemman tiedon perusteella tiettyyn materiaaliin, mutta tilanne voi lisätä analyysin epävarmuutta. Haasteena on myös, että ohjelmiston käyttäjällä tulee olla tutkimusalueeseen, -menetelmään ja ohjelmistoon liittyvää asiantuntijuutta. Analyysin tuottaman tuloksen luotettavuus ja oikeellisuus täytyy aina arvioida tutkijan toimesta. Siten ohjelman käytössä on aina mukana subjektiivisuutta, vaikka ohjelman käytön tarkoituksena on lisätä tutkimuksen objektiivisuutta ja toistettavuutta.

Barbarella ym. (2019) nostavat esille haasteen, joka liittyy kaukokartoituksen käyttöön geomorfologian tutkimisessa. He kuvaavat, kuinka digitaalisia korkeusmalleja ja niihin perustuvia karttoja käytetään tutkimuksen pohjana, mutta karttojen tarkkuuteen ja sopivuuteen tähän tarkoitukseen ei kiinnitetä erityistä huomiota. Tämä voi johtaa virheisiin analyysissä ja tutkimustuloksissa. Tarvittaisiin tarkempi prosessi karttojen soveltuvuuden ja oikeellisuuden tarkistamiseksi. Eryisen tärkeää karttojen oikeellisuuden varmistaminen on alueilla, jotka muuttuvat nopeasti. Tällaisia alueita ovat nopeasti lisääntyvän ihmistoiminnan ja runsaan eroosion alaiset alueet sekä alueet, jotka reagoivat voimakkaasti ilmastonmuutokseen.

5.2 Hyödyt

Yksi suurimmista hyödyistä kaukokartoituksen käytössä geodiversiteetin tutkimiseen on kustannusero kaukokartoitus- ja kenttätutkimusmenetelmien välillä. Aineiston kerääminen kenttätutkimuksella suurelta alueelta on työläs ja aikaa vievä tehtävä (esim. Hjort & Luoto 2012: 79).

Kaukokartoitusaineistojen käyttö voi olla tutkijalle ilmaista, kuten esimerkiksi Landsat-aineistojen käyttö. Myös uuden aineiston kerääminen tiettyä tutkimusta varten voi olla kustannustehokasta verrattuna kenttätutkimukseen alueen ollessa suuri. Barbarella ym. (2019: 2) tarkentavat tätä vielä toteamalla, että maanpinnalla tapahtuva maanmittaus soveltuu alueille, jotka ovat korkeintaan kymmeniä hehtaareja ja joissa on riittävästi valoa. Tätä suuremmilla alueilla maanmittaus maasta käsin on aikaa vievää ja kallista, sekä mittauksen että aineiston käsittelyn osalta. Globaalien satelliittiaineistojen myötä useimmista alueista on jo olemassa jonkin verran kaukokartoitusaineistoa, josta geodiversiteettiä voidaan lähteä tutkimaan. Tarvittaessa spesifimmät tutkimukset voidaan sitten kohdentaa ja rajata tehokkaasti ilmaisten aineistojen perusteella.

Yhdistettynä eri kaukokartoitusmenetelmien hyödyt tulevat parhaiten esille. Lidar-menetelmää sekä multi- ja hyperspektraalisten sensoreiden tuottamia aineistoja hyödyntäneistä tutkimuksesta voidaan tehdä taulukon 1 mukainen yhteenveto. Lidar-menetelmän vahvuus on korkeusmallien luominen ja topografian tutkiminen. Multispektraalisella aineistolla voidaan tutkia maanpinnan materiaaleja ja tekstuureita ja luokitella muodostumia. Hyperspektraalisella aineistolla voidaan selvittää jopa mineraalitasolla materiaalien koostumukset. Yhdistettynä ja esimerkiksi Hjortin ja Luodon (2009) käyttämällä laskukaavalla näillä menetelmillä saa jo todella monipuolisen kuvan ja numeerisen arvon tutkittavan alueen geodiversiteetistä.

Taulukko 1. Yhteenveto siitä, mihin Lidar-aineistoja sekä multi- ja hyperspektraalisia aineistoja hyödynnettiin tutkimuksissa. Lidar-aineistolla kartoitettiin topografiaa, multispektraalisella aineistolla hydrologisia muodostumia, maanpinnan materiaaleja ja geomorfologisia muodostumia, ja hyperspektraalisella aineistolla tutkittiin mineraalitason vaihtelua.

| Tutkimuksessa käytetty aineisto | Tutkimuskohde |
|--|---|
| Lidar-aineisto | Topografia |
| Multispektraalinen aineisto | Hydrologiset muodostumat, maanpinnan materiaalit ja geomorfologiset muodostumat |
| Hyperspektraalinen aineisto | Maaperän mineraalikoostumus |

5.3 Tulevaisuus

Kun aiemmin mainittuja haasteita kaukokartoitusmenetelmien käytössä geodiversiteetin kartoittamiseen saadaan ratkaistua, tulevaisuus tämän aihepiirin tutkimuksen parissa on täynnä mahdollisuuksia. Aiemmin mainittu haaste suurten aineistojen prosessoinnin suhteen voi Zarnetsken ym. (2019:554) mukaan ratketa esimerkiksi pilvipalveluiden avulla. Pilvipalveluihin perustuvat käsittelyalustat, kuten Google Earth Engine, voivat mahdollistaa aineiston saatavuuden ja käsittelyn.

Globaalia pintavesien muutosta 30 vuoden aikavälillä tutkineet Pekel ym. (2016) välyttävät tulevaisuuden mahdollisuuksia pintavesien tutkimisessa. He kuvaavat, kuinka kaikki mahdolliset satelliittihavainnot voitaisiin yhdistää yhdeksi reaaliaikaiseksi pintavesien seurantamenetelmäksi, jos käytössä olisi tietokone, jonka kapasiteetti olisi petatavun luokkaa. Pilvipalveluihin yhdistettynä kyseisen tietokoneen ei tarvitse olla tutkijan hallussa, vaan sitä voidaan operoida edellä mainitun pilvipalvelun kautta.

Kuten Lausch ym. (2020: 20) toteavat, yksikään kaukokartoitusmenetelmistä, -välineistä ja tilastollisista malleista ei ole riittävä yksin tuottamaan ymmärrystä geodiversiteetistä ja sen kaikista monimutkaisista yhteyksistä ihmistoiminnan ja elollisen luonnon kanssa. Useiden eri menetelmien yhdistäminen sen sijaan mahdollistaa entistä tarkemmat tutkimustulokset ja monikäyttöisemmät mallit.

6 Johtopäätökset

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten kaukokartoitusta voidaan hyödyntää geodiversiteetin tutkimisessa. Erityisenä kiinnostuksen kohteena oli, miten Lidar-menetelmää sekä multi- ja hyperspektraalisia sensoreita on hyödynnetty ja miten niiden tuottamista aineistoista saadaan koostettua kokonaiskuva alueen geodiversiteetistä.

Tutkimuksessa selvisi, että edellä mainituilla tarkempaan tarkasteluun valituilla kaukokartoitusmenetelmillä on jokaisella vahvuutensa geodiversiteetin osien kartoittamisessa. Lidar-menetelmä soveltuu erityisen hyvin topografian tutkimiseen DEM-mallien muodostamisen kautta. Multispektraalisten sensorien tuottama aineisto soveltuu erityisesti pintavesialueiden ja maanpinnan materiaalien tutkimiseen sekä muodostumien luokitteluun. Multispektraalista aineistoa hyödynnettiin myös alustavana tutkimuksena, jonka perusteella päätettiin alue,

jota tutkittiin hyperspektraalisella sensorilla. Hyperspektraalinen aineisto sopi erityisen hyvin geodiversiteetin tarkasteluun sen pienimmässä mittakaavassa eli mineraalitasolla.

Eri aineistoja yhdistämällä päästään kattavaan ja tarkkaan kuvaan tutkittavalla alueella esiintyvistä geodiversiteetin elementeistä. Käytössä on useita eri indeksejä ja laskukaa-voja, joilla nämä elementit lasketaan alueen kokonaisgeodiversiteetin selvittämiseksi. Selvää oli, että tarvittaisiin yhteneväisiä käytäntöjä ensinnäkin siihen, mitä geodiversiteetin elementtejä tutkimuksiin sisällytetään. Toisekseen yhteneväisyyttä kaivataan siihen, mitä laskutapaa kokonaisgeodiversiteetin koostamiseen käytetään.

Geodiversiteetin suurta merkitystä elollisen luonnon pohjana on vasta viime vuosikymmeninä alettu ymmärtää. Tietoa siitä tarvitaan enemmän sekä pienessä, paikallisessa mittakaavassa että globaalilla tasolla. Teknologian kehittyessä pystymme yhä paremmin kartoittamaan geodiversiteettiä, ja tämä voi toimia pohjana ihmistoiminnan ja ilmastonmuutoksen vaikutusten ymmärtämiselle sekä suojelupäätösten kohdentamiselle. Geodiversiteetti on muoutunut kautta maapallon syntyhistorian, ja nykyteknologian avulla voimme sekä ymmärtää että suojella sitä paremmin kuin koskaan ennen.

7 Lähteet

- Argyriou, A. V., Sarris, A., & Teeuw, R. M. (2016). Using geoinformatics and geomorphometrics to quantify the geodiversity of Crete, Greece. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 51, 47-59.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.04.006>
- Barbarella, M., Cuomo, A., Di Benedetto, A., Fiani, M., & Guida, D. (2019). Topographic base maps from remote sensing data for engineering geomorphological modelling: An application on coastal Mediterranean landscape. *Geosciences*, 9(12), 500.
<https://doi.org/10.3390/geosciences9120500>
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to remote sensing*. Guilford Press.
- Cao, W., Sofia, G., & Tarolli, P. (2020). Geomorphometric characterisation of natural and anthropogenic land covers. *Progress in Earth and Planetary Science*, 7(1), 1-17.
<https://doi.org/10.1186/s40645-019-0314-x>
- Chowdhury, P. R., Deshmukh, B., Goswami, A. K., & Prasad, S. S. (2010). Neural network based dunal landform mapping from multispectral images using texture features. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4(1), 171-184. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2010.2062491>
- Clark, R. N., Swayze, G. A., Livo, K. E., Kokaly, R. F., Sutley, S. J., Dalton, J. B., ... & Gent, C. A. (2003). Imaging spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the USGS Tetracorder and expert systems. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 108(E12). <https://doi.org/10.1029/2002JE001847>
- Crisp, J. R., Ellison, J. C. & Fischer, A. (2020) Current trends and future directions in quantitative geodiversity assessment. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. <https://doi.org/10.1177/0309133320967219>
- Dasgupta, P. (2021). *The economics of biodiversity: the Dasgupta review*. Hm Treasury.
- Emery, W., & Camps, A. (2017). Optical Imaging Systems. *Introduction to Satellite Remote Sensing*, 85–130.
- Ferrer-Valero, N., Hernández-Calvento, L., & Hernández-Cordero, A. I. (2019). Insights of long-term geomorphological evolution of coastal landscapes in hot-spot oceanic islands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(2), 565-580.
<https://doi.org/10.1002/esp.4518>
- Global Surface Water Explorer. Euroopan komissio. <<https://global-surface-water.appspot.com/>> 22.4.2022.
- Goetz, A. F. H. (2009). Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view. *Remote Sensing of Environment*, 113(SUPPL. 1), S5–S16.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.12.014>
- Gomez, C., Adeline, K., Bacha, S., Driessen, B., Gorretta, N., Lagacherie, P., ... & Briottet, X. (2018). Sensitivity of clay content prediction to spectral configuration of VNIR/SWIR imaging data, from multispectral to hyperspectral scenarios. *Remote Sensing of Environment*, 204, 18-30. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.047>
- Gordon, J. E., Crofts, R., Díaz-Martínez, E., & Woo, K. S. (2018). Enhancing the role of geoconservation in protected area management and nature conservation. *Geoheritage*, 10(2), 191-203. <https://doi.org/10.1007/s12371-017-0240-5>
- Gray, M. (2018). Geodiversity: the backbone of geoheritage and geoconservation. Teoksessa *Geoheritage* (pp. 13-25). Elsevier.
- Gray, M. (2004). *Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature*. John Wiley & Sons.
- Heidemann, H. K. (2012). *Lidar base specification* (No. 11-B4). US Geological Survey.
<https://doi.org/10.3133/tm11B4>

- Hjort, J., & Luoto, M. (2012). Can geodiversity be predicted from space? *Geomorphology*, 153–154, 74–80. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.02.01>
- Hjort, J., & Luoto, M. (2009). Geodiversity of high-latitude landscapes in northern Finland. *Geomorphology*, 115(1-2), 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.039>
- Johansson, C. E., toim. (2000). *Geodiversitet i nordisk naturvård*. Nordisk Ministerråd. Köpenhamn.
- Kwok, R. (2018). Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: losses and coupled variability (1958–2018). *Environmental Research Letters*, 13(10), 105005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae3ec>
- Lausch, A., Schaepman, M. E., Skidmore, A. K., Truckenbrodt, S. C., Hacker, J. M., Baade, J., ... & Thiel, C. (2020). Linking the remote sensing of geodiversity and traits relevant to biodiversity—Part II: Geomorphology, terrain and surfaces. *Remote sensing*, 12(22), 3690. <https://doi.org/10.3390/rs12223690>
- Liang, S., & Wang, J. (toim.). (2019). *Advanced remote sensing: terrestrial information extraction and applications*. Academic Press.
- Lucieer, A., & Stein, A. (2005). Texture-based landform segmentation of LiDAR imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6(3-4), 261-270. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2004.10.008>
- Lucieer, A., Stein, A., Fisher, P. (2005). Multivariate texture-based segmentation of remotely sensed imagery for extraction of objects and their uncertainty. *International Journal of Remote Sensing*. 26. 2917-2936. <https://doi.org/10.1080/01431160500057723>
- McKean, J., & Roering, J. (2004). Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology*, 57(3-4), 331-351. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(03\)00164-8](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00164-8)
- Manosso, F. C., Zwoliński, Z., Najwer, A., Basso, B. T., Santos, D. S., & Pagliarini, M. v. (2021). Spatial pattern of geodiversity assessment in the Marrecas River drainage basin, Paraná, Brazil. *Ecological Indicators*, 126, 107703. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2021.107703>
- Van der Meer, F. D., Van der Werff, H. M., Van Ruitenbeek, F. J., Hecker, C. A., Bakker, W. H., Noomen, M. F., ... & Woldai, T. (2012). Multi-and hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14(1), 112-128. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2011.08.002>
- Mielke, C., Bösche, N. K., Rogass, C., Segl, K., Gauert, C., & Kaufmann, H. (2014). Potential applications of the Sentinel-2 multispectral sensor and the EnMap hyperspectral sensor in mineral exploration. In *EARSeL EProceedings* (Vol. 13, No. 2, pp. 93-102). <https://doi.org/10.12760/01-2014-2-07>
- Milodowski, D. T., Hancock, S., Silvestri, S., & Mudd, S. M. (2020). Linking life and landscape with remote sensing. *Developments in Earth Surface Processes*, 23, 129–182. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.00005-9>
- Mitasova, H., Overton, M., & Harmon, R. S. (2005). Geospatial analysis of a coastal sand dune field evolution: Jockey's Ridge, North Carolina. *Geomorphology*, 72(1-4), 204-221. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.001>
- Mudd, S. M. (2020). Topographic data from satellites. *Developments in Earth Surface Processes*, 23, 91–128. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.00004-7>
- Orlandini, S., Tarolli, P., Moretti, G., & Dalla Fontana, G. (2011). On the prediction of channel heads in a complex alpine terrain using gridded elevation data. *Water Resources Research*, 47(2). <https://doi.org/10.1029/2010WR009648>
- Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418-422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>

- Ruban, D. A. (2010). Quantification of geodiversity and its loss. *Proceedings of the Geologists' Association*, 121(3), 326–333. <https://doi.org/10.1016/J.PGEOLA.2010.07.002>
- Serrano, E., & Ruiz-Flaño, P. (2007). Geodiversity: a theoretical and applied concept. *Geographica Helvetica*, 62(3), 140–147. <https://doi.org/10.5194/gh-62-140-2007>
- Tukiainen, H. & Hjort, J. (2021). Maisematason geodiversiteetti Suomessa (Landscape-scale geodiversity in Finland). *Terra* 133: 2, 55–76. <https://doi.org/10.30677/terra.99435>
- Uwera, S. (2019). *Environmental Applications of Remote Sensing*. Delve Publishing.
- Zarnetske, P. L., Read, Q. D., Record, S., Gaddis, K. D., Pau, S., Hobi, M. L., Malone, S. L., ym. (2019). Towards connecting biodiversity and geodiversity across scales with satellite remote sensing. *Global Ecology and Biogeography*, 28(5), 548–556. <https://doi.org/10.1111/geb.12887>
- Zheng, Z., Du, S., Taubenböck, H., & Zhang, X. (2022). Remote sensing techniques in the investigation of aeolian sand dunes: A review of recent advances. *Remote Sensing of Environment*, 271, 112913. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2022.112913>