

LÄMPÖKAMERAN HYÖDYNTÄMINEN DRONELLA OTETUISSA ILMA- KUVAUKSISSA

Juha Jokiniemi
Maisterintutkielma
Agroteknologia
Helsingin yliopisto
Maataloustieteiden osasto
09/2022

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos — Institution — Department Maataloustieteiden osasto	
Tekijä — Författare — Author Juha Jokiniemi			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Lämpökameran hyödyntäminen dronella otetuissa ilmakuvauksissa			
Oppiaine — Läroämne — Subject Agroteknologia			
Työn laji — Arbetets art — Level Maisteritutkielma	Aika — Datum — Month and year Syyskuu 2022	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 49	
<p>Tiivistelmä — Referat — Abstract</p> <p>Dronejen käyttö on lisääntynyt voimakkaasti viimeisten vuosien aikana. Ensimmäiset dronet on kehitetty jo 1900-luvun alussa. Myös lämpökameroita on käytetty jo useamman vuosikymmenen ajan. Näiden yhteiskäyttö on yleistynyt 2010-luvun aikana. Dronen ja lämpökameran avulla on tutkittu erityisesti kasvien lämpöstressiä.</p> <p>Tavoitteena oli selvittää, millaisia käyttömahdollisuuksia droneen kiinnitetyllä lämpökameralla on ja ovatko kameran antamat tulokset riittävän tarkkoja esimerkiksi täsmäviljelyssä hyödyntämiseen. Lisäksi tutkittiin kuvausprosessin käyttökelpoisuutta ja lämpökameran kalibrointia. Tutkimuksessa käytettiin lämpökameran rinnalla kolmea muuta eri lämpötilan mittausten menetelmää. Tutkimus suoritettiin Helsingin yliopiston Viikin tutkimustilalla. Kuvattavana kohteina olivat nurmi, jonka kasvuaste oli Zadoksin (BBCH) asteikolla 12–13, edellisenä syksynä kultivoitu maa sekä kynnety maa. Tutkimuksessa oli käytössä itserakennettu drone (Tarot Ironman:n runko) sekä Flir Duo Pro R -lämpökamera. Tutkimus suoritettiin touko-kesäkuussa 2022. Lämpökuvien käsittely tehtiin Pix4D ja Matlab-ohjelmilla.</p> <p>Lämpökameralla saatiin kuvattua kaikki peltolohkot. Jokaisesta koelohkosta mitattiin vertailulämpötilat, jotta voitiin tutkia ilmasta otetun kuvan paikkaansa pitävyyttä. Kontrollipisteet mitattiin GCP-pisteiden (Ground Control Point) läheisyydestä kolmen metrin etäisyydeltä merkkitolpasta.</p> <p>Dronella otettujen lämpökuvien ja Ahlbornin mittarin tulosten välinen korrelaatiokerroin oli 0,67; joka on kohtalaisen korkea. Flir-käsilämpökameran ja dronella otettujen lämpökuvien välinen korrelaatio ei osoittautunut tilastollisesti merkitseväksi. Tähän vaikutti luultavasti Flir-käsilämpökameralla otettujen mittauspisteiden epätarkkuus kunnollisen kuvaustelineen puuttuessa. Maaperäskannerin tuottaman lämpökartan ja dronella otettujen lämpökuvien välinen korrelaatio oli -0,11.</p> <p>Tutkimuksessa havaittiin myös kameran kulma-anturissa olevan jotain häiriötä, koska kaikki sen ottamat kuvat olivat virtuaalisella karttatasolla 90 astetta väärässä kulmassa. Tämä saatiin korjattua kuvankäsittelyohjelmalla. Dronen lämpökameran kalibrointi todettiin riittäväksi tutkimuksen olosuhteissa.</p> <p>Droneen kiinnitetty lämpökamera on riittävän tarkka mitattaessa lämpötiloja ilmasta, jos olosuhteet ovat kameralle oikeat. Tulevia kuvauksia varten kasvustoon tulisi saada lisää kiintopisteitä, jotta analysointiohjelma saisi muodostettua kohdealueelta luotettavan lämpökuvan. Myös säähän olisi kiinnitettävä huomiota, sillä vähäinenkin pilvisuus vaikuttaa lopputulokseen kameran ominaisuuksista johtuen. Myös maasta mitattujen kontrollipisteiden tarkkuuteen tulisi kiinnittää enemmän huomiota, sillä niillä on suuri vaikutus tuloksiin, koska maan lämpötila voi vaihdella hyvin pienenkin alueen sisällä. Tässäkin tutkimuksessa vierekkäisten mittauspisteiden välillä oli jopa useiden asteiden lämpötilaeroja.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Drone, lämpökamera, kalibrointi, maaperäskanneri, kasvuston lämpötila			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Maataloustieteiden osasto			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Työtä ohjasi apulaisprofessori Antti Lajunen			

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Faculty of Agricultural and Forest		Laitos — Institution — Department Department of Agricultural Science	
Tekijä — Författare — Author Juha Jokiniemi			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Utilization of a thermal camera in aerial photography taken with a drone			
Oppiaine — Läroämne — Subject Agrotechnology			
Työn laji — Arbetets art — Level M. Sc. Thesis	Aika — Datum — Month and year September 2022	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 49	
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>The use of drones has increased strongly in recent years. The first drones were already developed at the beginning of the 20th century. Thermal cameras have also been used for several decades. The joint use of these has become more common during the 2010s. With the help of a drone and a thermal camera, the heat stress of plants has been studied.</p> <p>The goal was to find out what kind of usage possibilities a thermal camera attached to a drone has and whether the results given by the camera are accurate enough to be used in, for example, precision farming. In addition, the usability of the imaging process and the calibration of the thermal camera were investigated. In addition to the thermal camera, three other different temperature measurement methods were used in the study. The study was conducted at the University of Helsinki's Viikki research farm. The objects to be photographed were grass with a growth rate of 12–13 on the Zadoks (BBCH) scale, cultivated land the previous fall, and plowed land. The research used a self-built drone (Tarot Ironman frame) and a Flir Duo Pro R thermal camera. The research was carried out in May-June 2022. Processing of thermal images was done with Pix4D and Matlab programs.</p> <p>All field blocks were photographed with a thermal camera. Reference temperatures were measured from each test block, so that the accuracy of the image taken from the air could be examined. The control points were measured in the vicinity of GCP points (Ground Control Point) at a distance of three meters from the marker post.</p> <p>The correlation coefficient between the thermal images taken by the drone and the results of the Ahlborn meter was 0.67; which is moderately high. The correlation between the Flir hand-held thermal camera and the thermal images taken by the drone did not prove to be statistically significant. This was probably influenced by the inaccuracy of the measurement points taken with the Flir handheld thermal camera due to the lack of a proper photography stand. The correlation between the heat map produced by the soil scanner and the thermal images taken by the drone was -0.11.</p> <p>The investigation also found that there was something wrong with the camera's angle sensor, because all the pictures it took were at the wrong angle by 90 degrees on the virtual map plane. This was corrected with an image processing program. The calibration of the drone's thermal camera was found to be sufficient under the conditions of the study.</p> <p>The thermal camera attached to the drone is accurate enough to measure temperatures from the air if the conditions are right for the camera. For future descriptions, more fixed points should be obtained in the growth, so that the analysis program could form a reliable thermal image of the target area. You should also pay attention to the weather, because even a slight cloudiness affects the result due to the camera's characteristics. Also, more attention should be paid to the accuracy of the control points measured from the ground, as they have a great influence on the results, since the temperature of the ground can vary very much even within a small area. In this study too, there were temperature differences of several degrees between adjacent measurement points.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Drone, Thermal camera, calibration, ground scanner, canopy temperature			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Department of agricultural sciences			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information The thesis was supervised by assistant professor Antti Lajunen.			

SISÄLLYS

Käsitteet ja lyhenteet.....	4
1 JOHDANTO	5
2 KIRJALLISUUSKATSAUS	6
2.1 Lämpökuvauksen perusteet ja historia	6
2.2 Miehittämätön ilma-alus eli drone.....	7
2.3 Lämpökamera ja droneissa käytettävät lämpökamerat	9
2.4 Lämpökameran kalibrointi	11
2.5 Maaperäskanneri.....	12
2.6 Drone ja lämpökamera maataloudessa	13
3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET	15
4 AINEISTO JA MENETELMÄT	15
4.1. Tutkimusalueen esittely ja kuvattavat kohteet.....	15
4.2 Tutkimuksessa käytetyt ohjelmat	16
4.3 Koeasetelmassa käytetyt laitteet.....	16
4.4 Tutkimuksessa suoritettut mittaukset	18
4.5 Tutkimuksessa käytetyt laskentakaavat.....	20
5 TULOKSET	21
5.1 Koepäivinä mitatut olosuhteet.....	21
5.2 Lämpökameran kalibrointi	21
5.3 Maaperäskannerilla saadut tulokset.....	25
5.4 Lämpökameralla saadut lämpökartat.....	32
5.5 Maan ja ilman väliset tilastolliset kertoimet.....	37
6 TULOSTEN TARKASTELU.....	37
6.1 Maan lämpötilojen vertailu eri menetelmillä.....	37
6.2 Lämpökameran kalibrointi	40
7 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	43
8 KIITOKSET	44
9 LÄHTEET.....	45

Käsitteet ja lyhenteet

Drone	Yleisnimitys ilmassa, maassa tai vedessä kulkevalle laitteelle, jossa ei ole kuljettajaa ja ohjaus tapahtuu kauko-ohjaimella.
GCP	Ground Control Point eli maahan näkyvästi merkitty tiedetty koordinaattipiste. Käytetään apuna muun muassa ortomosaiikkikuvan teossa.
GNSS	Global Navigation Satellite System eli maailmanlaajuinen paikannusjärjestelmä, joka koostuu satelliiteista. Käytetään muun muassa paikkatietosovelluksissa paikan määrittämiseen virtuaalisella karttatasolla.
Offset	Poikkeama jostain ennalta määritellystä arvosta, esimerkiksi lämpötilan poikkeama tai siirtymä asetetusta arvosta.
Overlap-arvo	Tässä yhteydessä kameran ottamien kuvien päällekkäisyysarvo.
RGB	Red-Green-Blue värimalli eli värien muodostusmalli, jossa pääväreinä ovat punainen, vihreä ja sininen.
BBCH	Kasvuasteikko, jolla voidaan määrittää kasvin kasvuvaihe. Asteikko on kehitetty Saksassa.

1 JOHDANTO

Miehittämättömät lentoalukset eli dronet ovat yleistyneet voimakkaasti maataloudessa viimeisten vuosien aikana. Dronet eivät kuitenkaan ole uusi keksintö, sillä esimerkiksi armeija ja teollisuus ovat käyttäneet niitä jo muutamien vuosikymmenien ajan (Ahirwar ym. 2019). Dronet ovat hyvin monikäyttöisiä ja ne soveltuvat hyvin kuvaamaan suuria alueita itsenäisesti sekä yhdessä satelliittien kanssa (Guo ym. 2019). Dronen etu satelliittiin on pilvien ja ilmakehän vääristävän vaikutuksen puuttuminen niiden huomattavasti matalamman lentokorkeuden vuoksi (Autio ym. 2014). Myös parempi dronella saatava kuvan resoluutio on hyödyksi, sillä tällöin kuvan käyttömahdollisuudet esimerkiksi täsmäviljelyssä kasvavat (Zhang & Kovacs 2012).

Lämpökameraa on käytetty aktiivisesti ilmakuvauksissa viimeisten vuosien aikana. Erityisesti kasvustojen kuvaukseen lämpökamera sopii hyvin silloin, kun pitää määrittää kasvuston vesitasapainoa (Berni ym. 2009). Myös hedelmien ja vihannesten tuotannossa lämpökameraa on alettu hyödyntää edellisistä vuosista enemmän, koska lämpökameralla kuvattaessa voidaan käydä läpi suuri ala lyhyessä ajassa (Hellebrandy ym. 2000, Ishimwe ym. 2014). Lämpökameran hyödyntäminen on aloitettu esimerkiksi lääketieteessä jo 1950-luvulla ja tultaessa vuosikymmen eteenpäin alkoivat markkinoille tulla ensimmäiset livekuvaa näyttävät kamerat (Lawson 1956, Gerald 2000).

Maataloudessa dronet ovat olleet hyödyllisiä erityisesti kasvustokuvauksissa (Zhang & Kovacs 2012). Kasvustokuvauksissa on kuitenkin otettava huomioon luonnon ja ihmisen aiheuttamat elektromagneettiseen aaltoon vaikuttavat häiriötekijät, jotka voivat vaikuttaa ratkaisevasti lopputulokseen. Tämä johtuu mitattavien suureiden vaihteluvälin pienuudesta. Esimerkiksi lämpötilan vaihtelu kasvustossa voi olla vain muutamia asteita tai sen kymmenyksiä (Weidong ym. 2002). Sama pätee maan kosteuden määrittämisen suhteen (Weidong ym. 2002).

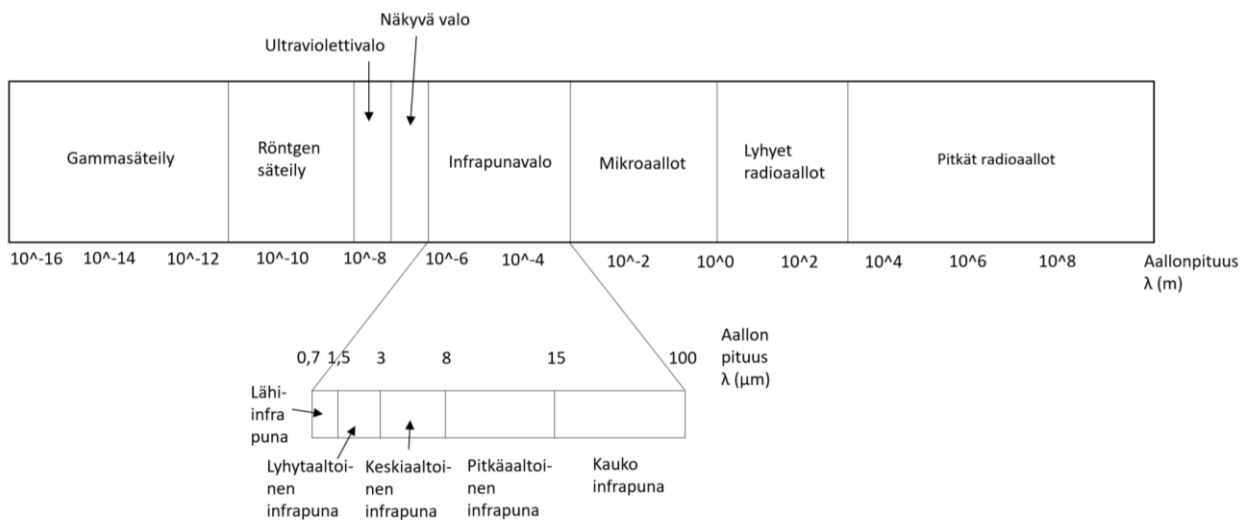
Mahdollisia häiriötekijöitä kuvauksissa ovat muun muassa pakokaasut ja ilman pienhiukkaset (Berni ym. 2009, Stander ym. 2021). Myös lentokorkeus ja dronen vauhti kuvauksen aikana vaikuttavat kuvien tarkkuuteen (Niu ym. 2019). Dronejen avulla voidaan myös tutkia muun muassa kasvuston kuntoa sairauksien tai vesitasapainon osalta. Myös karjantarkkailu ja eläinten siirtely on havaittu hyväksi dronen käyttökohteeksi vaikeakulkuisessa maastossa (Saha ym. 2018, Merwe ym. 2020).

Tässä tutkimuksessa perehdyttiin siihen, kuinka hyvin keskinkertainen lämpökamera pystyy kuvaamaan kasvuston lämpötilan vaihteluita ja mitä niistä voidaan mahdollisesti tulkita lämpökameran voi kalibroida pelto-olosuhteissa ilman kalliita kalibrointilaitteita ja onko saadulla tuloksella vaikutusta saatuihin kuviin. Lisäksi tutkimuksessa tutkittiin lämpökameran kalibrointiprosessia, sekä koko kuvausketjun käyttökelpoisuutta.

2 KIRJALLISUUSKATSAUS

2.1 Lämpökuvauksen perusteet ja historia

Lämpökuvaus perustuu kohteen lähettämään infrapunasäteilyyn, jota jokainen objekti lähettää sen ollessa lämpimämpi, kuin absoluuttinen nollapiste, joka on $-273,15$ celsiusastetta tai nolla kelviniä. Infrapunasäteily voidaan havaita aina lämpösäteilyä mittaavalla kameralla tai laitteella, mutta lämpötilaerojen ollessa hyvin pieniä on laitteen on oltava hyvin tarkka. Kuvaustapahtumassa kamerasen tai muun vastaavan laitteen lämpösensori mittaa kohteen lähettämän lämpösäteilyn sähkömagneettisen aallon ja muuttaa sen elektroniseen muotoon, joka voidaan havaita ihmissilmällä esimerkiksi tietokoneen näytöltä muutettuna näkyvän valon aallonpituuden väreiksi (Meola & Carlomango 2004). Infrapunasäteilyn aallonpituusalue on noin 780–1000 mikrometriä (Meola & Carlomango 2004, ICNIRP 2022). Koko sähkömagneettinen spektri on hyvin laaja ja infrapunasäteily on vain hyvin pieni osa sitä (Messina & Modica 2020) (kuva 1).



Kuva 1. Suuntaa antava sähkömagneettisen säteilyn spektri. Muokattu lähteestä Messina & Modica 2020.

Saatu kuva voidaan muuttaa moneen erilaiseen esitysmuotoon riippuen siitä, mikä on kuvauksen kohde. Kuva voi olla esimerkiksi mustavalkoinen tai värikäs, jossa väriskaala on asetettu muuttuvan lämpötilan mukaan pykälittäin esimerkiksi 0,1 celsiusasteen välein. Kuvassa voidaan keskittyä myös esimerkiksi pelkästään tiettyyn lämpötila-alueeseen, jolloin lämpötilaerot ovat havaittavissa kuvassa jollain tietyllä lämpötilavälillä (Flir 2017).

Lämpökuvauksen historia ulottuu 1800-luvun alkuun, jolloin Frederick William Herschel (1738–1822) keksi prisman ja alkeellisen lämpöparin. Aluksi lämpösensorin ja lämpöparin kehitys kulkivat rinnakkain, mutta tullessa 1900-luvulle alkoi nykyisen kaltaisten lämpökameroiden kehitystyö. 1940-luvulla lämpökamera saatiin havaitsemaan aallonpituudet noin kolmeen mikrometriin asti (Rogalski 2012). Tällöin yhden kuvan kehittyminen kesti noin tunnin, mutta jo 1960-luvulla kuvan kehittyminen kesti enää noin viisi minuuttia. 1960-luvulla onnistuttiin kehittämään myös ensimmäinen reaaliaikaisesti kuvaa antava lämpökamera (Gerald 2000). Kehitetty teknologia otettiin käyttöön erityisesti astronomiassa ja maanpuolustuksessa. Lämpökameroiden hyödyntämisen aloittaminen lento- liikenteessä on ollut suuri askel ilmakuvausissa (Rogalski 2012).

2.2 Miehitämätön ilma-alus eli drone

Nykyisin miehitämätöntä, langattomasti ohjattavaa ilma-alusta voidaan kutsua droneksi. Ohjaus tapahtuu joko lentäjän omilla komennoilla tai ennalta droneen syötetyn lentotehtävän mukaisesti. Dronejen perustana on nykyään alumiininen tai hiilikuituinen runko, johon kiinnitetään sähkömoottorit ja roottorit (kuva 2). Lisäksi perusosina droneissa on GNSS-paikannusjärjestelmä ja kauko-ohjauksen vastaanotin. Myös akku on yleensä runkoon erikseen kiinnitettävä, mutta joissakin tapauksissa se on integroitu rungon sisään. Poikkeuksellisissa tapauksissa dronen tehonsyöttö voi olla kaapelilla, jolloin drone on maahan ankkuroitu ilma-alus (Brzozowski ym. 2018, Ahirwar ym. 2019).



Kuva 2. Kuusiroottorinen drone varustettuna erilaisilla mittausvarusteilla. Kuva: Mikael Änäkkälä.

Dronet voidaan jakaa karkeasti kiinteäsiipisiin ja roottorillisiin. Kiinteäsiipiset dronet muistuttavat rakenteeltaan enemmän perinteistä lentokonetta, kun taas roottorilliset muistuttavat enemmän helikopteria. Myös näiden kahden yhdistelmiä on olemassa, yleensä siinä tapauksessa niiden perusrunkona on kiinteäsiipinen ilma-alus, jossa on potkuri takana tai edessä (Cai ym. 2010, Vergouw ym. 2016). Nykyään dronejen painoskaala on suuri, sillä painoa voi olla aina muutamasta sadasta grammasta yli kahteenkymmeneen kilogrammaan (Jaakkola ym. 2010, Bendig ym. 2016). Dronessa voi olla aina yhdestä kuuteen roottoria, mutta myös useampi roottoriset ovat mahdollisia. Ne ovat kuitenkin huomattavasti harvinaisempia. Yleisin roottorien lukumäärä on neljästä ylöspäin, jolloin saadaan liikkeet mahdollisimman sulaviksi (Merwe ym. 2020).

Ensimmäiset dronen kaltaiset laitteet ovat peräisin 1700-luvun lopulta. Tällöin ne olivat käytännössä kuumailmapalloja, joiden etäohjaaminen ei ollut mahdollista. Tultaessa 1900-luvulle ilmailun kehitys alkoi ajaa miehittämättömiä ilma-aluksia nykyisen kaltaiseen suuntaan. Ensimmäisessä maailmasodassa oli jo käytössä itse lentäviä ilma-aluksia, jotka pystyivät lentämään ennalta määrättyä reittiä polttoaineen loppumiseen saakka. Nykyisenkaltaiset lentävät ilma-alukset tulivat vasta kylmän sodan aikana 1980-luvulla. Viimeisen kymmenen vuoden aikana dronet ovat kehittyneet sellaisiksi, millaisena me näemme ne nykypäivänä (Tetrault 2015, Saha ym. 2018).

Dronen lennättämiselle on asetettu tarkkoja määritelmiä ja lakeja, joita jokaisen lennättäjän on noudatettava. Tärkeimpiä ovat ihmisen yksityisyyden suojaaminen ja oikean lentokorkeuden pitäminen vaarantamatta muuta lentoliikennettä ja maassa kulkijoita. Lentäjältä vaaditaan myös hyväksytysti

suoritettu lentolupa, jos droneen on kiinnitetty kamera tai se painaa yli 250 grammaa. Ylimmäksi korkeudeksi ilman erillisiä poikkeuslupia on asetettu 120 metriä. Säädökset on koottu Euroopan Unionin yhteiseen säännöstöön ja säännöt on päivitetty 2019 (EU 2019). Suomen kansalliset säännökset on päivitetty 2022 alussa ja siinä määritellään tarkemmin dronen lennättämiseen liittyviä säännöksiä Suomen ilmatilassa (Traficom 2022).

2.3 Lämpökamera ja droneissa käytettävät lämpökamerat

Lämpökameran ja normaalin kameran välillä on toimintaperiaatteessa huomattava ero. Lämpökamera pystyy tunnistamaan ja näkemään sen osan infrapunasäteilyä, joka on lämpösäteilyä. Se taas ei pysty näkemään ihmissilmälle näkyvän valon aallonpituuksia. Normaali kamera taas ei pysty näkemään infrapunasäteilyä, vaan ainoastaan ihmissilmälle näkyvää aallonpituutta. Lämpökamera koostuu normaalin kameran tapaan linseistä ja mekaanisista sulkijoista (Teledyne 2019). Erona tavalliseen kameraan on lämpösensori, jonka saaman sähkömagneettisen pulssin perusteella kuva tallentuu muistikortille tai on katsottavissa livevideolla (Teledyne 2019).

Lämpökameratyyppinä on olemassa kahta erilaista ja niiden luokittelu perustuu sensorin jäähdyytystyyliin. Jäähdytetyt kamerat ovat hyvin kalliita ja ne operoivat pääasiassa tyhjiössä lähellä absoluuttista nolapistettä. Niitä ei voida käyttää normaalissa ilmanpaineessa tai korkeassa lämpötilassa, koska ne eivät kestä sitä niiden rakenteellisten ominaisuuksien perusteella (Szafron 2014). Ne ovat myös suuria ja painavia, joten tästä syystä niitä käytetään vain merkittävässä määrin satelliiteissa (Gallo ym. 1993(ref. Mesas-Carrascosa ym. 2018)). Jäähdyttämättömät kamerat ovat normaaleissa olosuhteissa toimivia, mutta ne eivät taas ole yhtä tarkkoja jäähdytettyihin verrattuna (Szafron 2014).

Lämpökameran resoluutio on huonompi verrattuna RGB (Red-Green-Blue) -kameraan, koska infrapunasäteilyn havaitsemiseen käytettävän sensorin on oltava kooltaan isompi johtuen infrapunasäteilyn laajemmasta aallonpituusalueesta (Teledyne 2020). Otettaessa kuvia lämpökameran avulla on tärkeää saada kuviin suuri päällekkäisyys eli overlap, koska kameran resoluution ollessa huonompi verrattuna normaaliin RGB- kameraan, kuvan tarkka fokusalue on hyvin pieni (Berni ym. 2009). Lämpökameroita on nykyään myynnissä monia erilaisia ja moneen eri tarkoitukseen. Nykyisen teknologiakehityksen avulla niitä on integroitu jo myös joihinkin matkapuhelimiin. Yleisesti käytössä on kuitenkin käsikäyttöisiä malleja (kuva 3).



Kuva 3. Käsikäyttöinen lämpökamera, jossa myös kuvien tallennusmahdollisuus. Kuva: Juha Jokiniemi.

Droneihin on olemassa monia erilaisia lämpökameroita. Valmistajia ovat muun muassa Flir ja MicaSense sekä senseFly (Teledyne 2021, MicaSense 2021, SenseFly 2022). Tässä tutkimuksessa käytössä oli Flir Duo Pro R- lämpökamera (kuva 4). Droneissa käytettävien lämpökameroiden on oltava kevyitä, jotta koko dronen paino olisi mahdollisimman pieni (Bendig ym. 2012).

Dronejen lämpökameroista Flir Duo Pro R ja Flir Vue Pro R 640 ovat käytännöllisesti katsoen sama tuote, mutta Flir Duo Pro:ssa on mukana myös RGB-kamera ja tästä syystä se on paljon painavampi. ThermoMap on valmiiksi integroitu oman dronensa sisään, joten sen kiinnittäminen toiseen droneen ei onnistu ilman rakennusteknisiä toimenpiteitä (Sagan ym. 2019). Dronen lämpökameroiden keskeisiä ominaisuuksia ovat muun muassa mahdollisimman pieni paino ja hyvä tarkkuus (taulukko 1).



Kuva 4. Malliesimerkki dronessa käytettävästä lämpökamerasta. Kuva: Juha Jokiniemi.

Taulukko 1. Erilaisten lämpökameroiden keskeisimpiä ominaisuuksia. Taulukko muokattu lähteistä Teledyne 2019, Sagan ym. 2019.

	Flir Duo Pro R	Flir Vue Pro R 640	ThermoMap
Paino (g)	325-375	92-113	134
Resoluutio	640x512 tai 336x256	640x512	640x512
Terminen herkkyys (°C)	0,05	0,05	0,1
Tarkkuus (aallonpituutta)	±5	±5	±5
Spektrikaista (µm)	7,5-13,5	7,5-13,5	7,5-13,5

2.4 Lämpökameran kalibrointi

Lämpökameran kalibroimiseen on olemassa erilaisia metodeja. Joillakin kameroilla on automaattinen kalibrointijärjestelmä, jolla ne pystyvät kalibroimaan itsensä ottamalla kuvan kameran sulki-
lessa kiinni ja vertaamalla sitä muihin otettuihin kuviin laskien samalla uudet parametrit (SenseFly 2017). Lämpökameran kalibroinnin absoluuttista arvoa ei voida kuitenkaan muissa kuin laboratorio-
olosuhteissa saavuttaa, koska siihen tarvittava laitteisto ja ohjelmat löytyvät yleensä vain valmistajilta itseltään (Teledyne 2019). Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kalibroitaessa lämpökameraa muissa
kuin tehtaan olosuhteissa, korjataan vain kameran antaman tuloksen offsettia eli poikkeamaa abso-
luuttisesta arvosta (Jensen ym. 2013, Mlynarczyk & Królewicz. 2021, Ribeiro-Gomes ym. 2017).

Kenttäolosuhteissa kalibroitipisteinä voidaan käyttää esimerkiksi kiehuvia vesiastioita ja sulavaa jäätä (Teledyne 2019, Mlynarczyk & Królewicz 2021). Lämpökameran offsetin määrittämisessä ja kalibroimisessa voidaan käyttää apuna myös erilaisia virtuaalisia neuroverkkoja (Neural Network), jotka antavat suuntaa antavia korjausparametreja niille annettujen ennakkotietojen avulla (Ribeiro-Gomes ym. 2017). Yhtenä vaihtoehtona kalibroinnissa on käyttää toista kameraa tai lämpöparia, jonka tiedetään antavan oikea tulos. Kalibroinnissa on otettava huomioon myös se, että kamera antaa erilaisen tuloksen riippuen tulevan säteilyn tulokulmasta (Mlynarczyk & Królewicz 2021).

Tehtailla ja valmistajilla on käytössään tarkka niin kutsuttu musta laatikko (Blackbody), joka pystyy imemään ja absorboimaan eli heijastamaan lähes kaiken siihen osuvan lämpösäteilyn. Laatikoiden määrä kalibroitivaiheessa vaihtelee sen mukaan, kuinka tarkasti halutaan määrittää kameran tarkkuus. Jokainen laatikko asetetaan tiettyyn lämpötilaan ja kameran parametreja muokataan sen mukaan, kuinka paljon sen antama tulos eroaa laatikon arvosta (Teledyne 2019). Mustia laatikoita voi myös ostaa itselleen ja näin tekivät Aragon ym. (2020) tutkimuksessaan, kun he kalibroivat tutkimuksessaan ollutta kameraansa.

Jäähdyttämättömän lämpökameran kalibroinnissa on otettava huomioon se, että jäähdytyksen puuttuessa lämpösensorilta laitteen oma kuumeneminen voi vääristää tuloksia herkemmin jäähdytettyihin kameroihin verrattuna. Tästä syystä tällaiset kamerat on saatava kalibroitua mahdollisimman hyvin (Jensen ym. 2012, Jensen ym. 2013, Ribeiro-Gomes ym. 2017). Lisäksi ilmakehän vääristävä vaikutus on otettava huomioon haluttaessa mahdollisimman absoluuttisia tuloksia (Berni ym. 2009, Stander ym. 2021).

2.5 Maaperäskanneri

Maaperäskannereita käytetään mitattaessa maan ominaisuuksia suurelta alalta ilman erillisten antureiden asettamista maahan. Mitattavia ominaisuuksia ovat muun muassa sähkönjohtavuus, kosteus ja lämpötila (Heege 2013). Maaperäskannereita on erilaisia ja niiden erot perustuvat lähinnä mittaamistekniikkaan. Käytetyimmät tekniikat sähkönjohtavuuden ja kosteuden mittaamiseen ovat erikoistuneet käyttämään joko elektromagneettista induktioita tai suoraa maakosketusta (Heege 2013). Maaperäskannereissa maan lämpötilaa mitataan esimerkiksi infrapunasäteilyä mittaavilla antureilla, jolloin mitattava aallonpituusalue on noin 0,7–100 mikrometriä (Heege 2013).

Tässä tutkimuksessa käytetyllä maaperäskannerilla (Veris iScan+) on tehty jo jonkin verran tutkimusta, mutta maaperän lämpötilaa on mitattu ja tutkittu paljon myös maassa kiinteästi olevien antureiden avulla, tästä esimerkkeinä tensiometri ja neutronikoetin (Kullberg ym. 2017, Crusiol ym. 2019). Käytössämme olleella skannerilla ovat tehneet tutkimusta muun muassa Lund 2019 ja Siljan-der 2021.

2.6 Drone ja lämpökamera maataloudessa

Dronelle on keksitty maataloudessa monia erilaisia käyttötarkoituksia ja dronet yleisesti maatalouden käytössä tulevat yleistymään entisestään tulevien vuosien aikana täsmäviljelyn yleistyttyä (Saha ym. 2018, Maddikunta ym. 2020, Merwe ym. 2020). Drone on hyvä kasvustokuvauksissa ja täsmäviljelyssä, koska sillä voidaan saavuttaa hyvin suuri resoluutio ja sillä saatu informaatio on siten käyttökelpoisempaa verrattuna satelliiteista saatuihin tietoihin (Zhang & Kovacs 2012). Dronella voidaan ottaa myös muita ilmakuvia erilaisista alueista tai kasvustoista sekä suorittaa erilaisia kasvustoon liittyviä täsmällisiä toimenpiteitä. Myös karjan tarkkailu vaikeakulkuisessa maastossa on dronella paljon helpompaa verrattuna kävellen suoritettavaan toimintaan (Saha ym. 2018, Merwe ym. 2020).

Droneen kiinnitettävien antureiden ja kameroiden avulla on mahdollista paikantaa hyvinkin tarkasti erilaisia kasvuston ongelmia, kuten sään tai villieläinten aiheuttamia ongelmia (Ahirwar ym. 2019, Vanitha 2021). Uusimmissa tutkimuksissa drone on osana automaattista rikkakasvien tunnistusjärjestelmää, jossa drone työskentelee yhdessä kitkijärobotin kanssa (Esposito ym. 2021). Drone on myös hyvin helppokäyttöinen, koska sillä kerralla nähtävä ala on suuri, eivätkä kuvaukset rajoitu pelkästään peltoihin (Ahirwar ym. 2019, Vanitha 2021). Dronella peltojen kuvaamisessa hyvänä puolenä on, että pilvet eivät häiritse kuvauksia lentokorkeuden ollessa paljon matalammalla, kuin pilvet yleensä (Autio ym. 2014). Erityisesti jäähdyttämättömien lämpökameroiden tapauksessa on otettava huomioon ympäristön vaikutus, koska olosuhteet eivät ole stabiileja, vaan ne muuttuvat jatkuvasti (Zhao ym. 2018.).

Dronella on mahdollista tehdä myös paikallista täsmälannoitusta ja tuholaisten torjuntaa vaikeakulkuisessa maastossa. Muun muassa Intiassa on kokeiltu kasvinsuojelullisia toimenpiteitä droneen kiinnitetyn miniruiskun avulla (Meivel ym. 2016). Euroopan Unionin alueella ja siten myös Suomessa dronella tehtävät kasvinsuojelulliset toimenpiteet ovat tiukasti kielletty, mutta asian käsittelyyn on

palattu ja siihen on mahdollisesti tulossa muutos tulevien vuosien aikana (Laitinen 2020). Tällä voitaisiin saada suuria helpotuksia muun muassa vieraslajien hävittämiseen vaikeakulkuisilta alueilta ja täten alkuperäiskasvillisuuden kantojen vahvistumista.

Dronella ja lämpökameralla on onnistuttu kuvaamaan puoli-automaattisesti pellolla olevia linnunpesiä, jotka olisivat ilman kuvausta tuhoutuneet koneiden ajaessa niiden yli (Santangeli ym. 2020). Myös kasveille aiheutunut lämpöstressi on onnistuttu kuvaamaan droneen kiinnitetyn lämpökameran avulla (Berni ym. 2009). Heidän tutkimuksessaan saatiin myös onnistuneesti kuvattua maissikasvuston lämpötilan vaihtelut eri vuorokauden aikoina. Samanlaiseen tulokseen ovat päässeet myös Gómez-Candón ym. (2016) omassa tutkimuksessaan kuuman ilmaston aiheuttamasta lämpöstressistä kasveille.

Kasvuston lämpötilaan vaikuttaa suuresti se, onko sen vieressä jokin lämpöä heijastava objekti tai muu vastaava lämmönlähde (Tucci ym. 2019). Lämpökuvien perusteella kasvustosta voidaan mitata ja havainnoida dronen avulla myös kosteutta, kasvitauteja ja satotasoa (Khanal ym. 2017). Dronella ja lämpökameralla on myös hyvä havainnoida sadetetuilla alueilla mahdollisia putkistojen vuotokohtia, koska ne näkyvät kuvissa hyvin muuta ympäristöä viileämpinä kohtina muuten lämpimässä maassa (Sener ym. 2019). Lämpökameralla on potentiaalia myös hedelmien ja vihannesten tuotannossa, koska sillä voidaan erottaa kypsät hedelmät raaoista ja vialliset ehjistä. Tämä säästää valtavasti aikaa, koska yhdellä lennolla voidaan käydä läpi suurikin avomaapelto tai laaja kasvihuone (Hellebrand ym. 2000). Myös hedelmien koon ja määrän arviointia on kokeiltu lämpökuvauksen avulla suoraan puista. Tulokset ovat olleet myös tässä tapauksessa lupaavia ja tekniikkaa kehitellään edelleen (Ishimwe ym. 2014).

Lämpökameralla on onnistuttu tekemään havaintoja myös metsätaloudessa (Jaakkola ym. 2010). Colturato ym. (2013) tutkimuksessaan onnistuivat kuvaamaan puista kuoren alla piilossa olevaa sairautta lämpökameran ja neuroverkon avulla. Tuloksissa päästiin yli yhdeksänkymmenen prosentin tarkkuuteen. Kasvien suolatasapainoa on myös tutkittu lämpökameran avulla ja tulokset ovat olleet lupaavia. Olosuhteiden ollessa optimaaliset voidaan kasveista todeta suolatasapainon poikkeamia (Urrestarazu 2013).

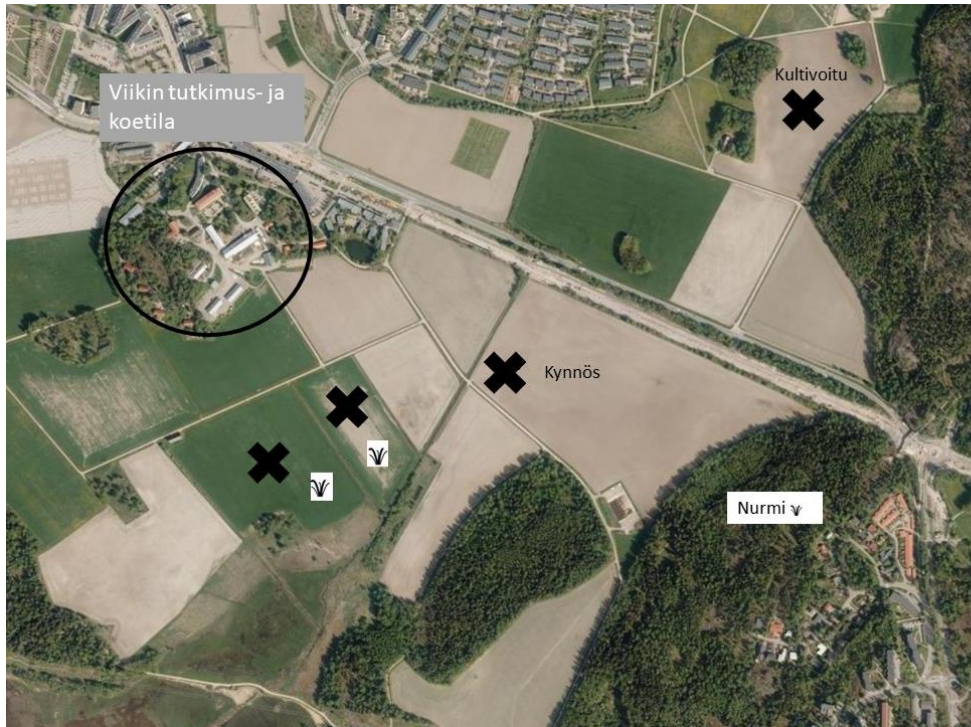
3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Tässä tutkimuksessa pyrittiin selvittämään, onko droneen kiinnitettävän lämpökameran avulla mahdollista saada käyttökelpoisia lämpötilakuvia ilmasta ja miten niitä voitaisiin hyödyntää. Kuvattavat kohteet jakautuivat kahteen eri kategoriaan, jotka olivat kasvusto ja muokattu maa. Kuvauskohteissa lämpötila-arvoja mitattiin kolmella muulla eri menetelmällä ja niitä verrattiin keskenään parhaimman selityssasteen löytämiseksi. Tutkimuksessa haluttiin myös selvittää, onko kuvausprosessi kokonaisuudessaan käytännön tasolla helppo toteuttaa, jos ajatellaan käytännön yleistymistä viljelijöiden keskuuteen. Lisäksi haluttiin selvittää, onko dronen lämpökameran kalibrointi välttämätön jokaisella lentokerralla erikseen, vai riittääkö vain yksi kerta samaan lopputulokseen.

4 AINEISTO JA MENETELMÄT

4.1. Tutkimusalueen esittely ja kuvattavat kohteet

Tutkimuksessa kuvattavat peltolohkot sijaitsivat Helsingin Viikissä Viikin tutkimustilalla (60°22'22.79"N, 25°01'89.79"E) (kuva 5). Kuvauksen kohteeksi valikoitui myöhäisen kevään vuoksi neljännen vuoden nurmik kasvusto sekä muokatuista pelloista kultivoitu ja kynnetty maa. Maan muokaus molemmissa muokkausmetodeissa oli suoritettu edellisenä syksynä. Nurmi oli mittaushetkellä juuri lähtenyt kasvuun. Alue sijaitsi Helsinki-Vantaan lentoaseman itäisen lähestymisalueen piirissä, joten lennonjohdolta oli erikseen kysyttävä lupa lentojen suorittamista varten, joka saatiin koko keksäksi.



Kuva 5. Kartta tähän tutkimukseen käytetyistä pelloista. Kuvattavat lohkot merkitty mustalla ruksilla. Kuva otettu Karttapaikka-sivustolta 20.04.2022 ja siihen on lisätty tarvittavat merkit.

4.2 Tutkimuksessa käytetyt ohjelmat

Tutkimuksessa käytettiin tilastollisten ennusteiden laskemiseen SPSS-tilasto-ohjelmaa (SPSS, IBM, USA). Tilastollisten arvojen laskemiseen käytettiin MS Exceliä (Microsoft, USA). Kuvien yhdistämisessä ortomosaiikkikuvaksi käytettiin Pix4Dmapper-ohjelmaa (Pix4D, Sveitsi). Autonomisen lentosuunnitelman tekemiseen käytettiin ArduPilot-ohjelmaa, joka toimii avoimen lähdekoodin periaatteella ja on jokaisen muokattavissa omiin tarpeisiin sopivaksi (ArduPilot, ArduPilot development team and community). Kalibroitokuvien käsittelyssä käytettiin Matlab-tiedosto-ohjelmaa, jolla muokattiin ja tarkasteltiin yksittäisten kuvien lämpötila-arvoja siihen itse kehitetyn lyhyen koodin avulla.

4.3 Koeasetelmassa käytetyt laitteet

Koeasetelmassa lennättämiseen käytettiin itse rakennettua dronea, jonka perusrungon nimi oli Tarot 650 Ironman (kuva 6). Droneen kiinnitettiin Flir Duo Pro R -lämpökamera (Flir systems, Inc., Wilsonville, USA) (kuva 4). Kuvauksesta dronella tutkimuksessa vastasi MMM Mikael Änäkkälä, sillä

hänellä oli dronen lennätystä varten vaadittava voimassa oleva dronen lentäjän hyväksytysti suoritettu tutkinto ja lupakirja.



Kuva 6. Kuvauksissa käytetty drone varustettuna lämpökameralla. Kuva: Juha Jokiniemi.

Tutkimuksessa maaperän skannaukseen käytettiin Veris iScan+ maaperäskanneria (Veris Technologies, Italy) (kuva 7.). Laite mittaa lämpötilan lisäksi maaperästä sähköjohtavuutta, punaisen ja infrapuna-alueen heijastuvuutta sekä kosteutta, mutta tässä tutkimuksessa kaikkia tietoja ei hyödynnetty. Laitteen työleveys ja työsyvyys mittauksissa oli noin viisi senttimetriä. Laitteella ajettiin noin 10–15 metrin välein 3–5 kilometriä tunnissa, jolloin saatiin riittävän tarkka kartta tutkimusta varten. Laite tallensi mittauspisteen yhden Hertzin taajuudella. Maaperäskanneri on suunniteltu käytettäväksi yhdessä työkoneen kanssa, joten se vaatii yksinään käytettävänä erikseen rakennetun tuki- ja kiinnitysmoduulin, joka rakennettiin aikaisemmin tehdyssä tutkimuksessa (Siljander 2021). Skannerin käytöstä tutkimuksessa vastasi apulaisprofessori Antti Lajunen, sillä hänellä oli oikeudet käyttää skannerin ohjelmistoja.



Kuva 7. Tutkimuksessa käytetty maaperäskanneri kiinnitettynä traktoriin. Oranssin kehikon avulla skannerin saa kiinnitettyä traktorin kolmipistenostolaitteeseen. Kuva: Antti Lajunen.

Lämpötilojen mittaukseen maasta ja ilmasta käytettiin Ahlbornin lämpötila-anturia (Almemo ZA 9020-FS thermo E4, Ahlborn, Germany). Toisena mittarina maan lämpötilaa mitattaessa käytettiin käsikäyttöistä lämpökameraa (Flir b50, Flir Systems ab, Sweden) (kuva 3). Tuulen nopeuden mittaamiseen käytettiin Ahlbornin tuulimittaria (Almemo FVA915-S120, Ahlborn, Germany). Ilman kosteuden mittaamiseen käytössä oli Lascar electronics:in mittari (EL-USB-2-LCD, Lascar Electronics, UK). Ahlborn-antureita luettiin Almemon dataloggerilla (Almemo 2690-8 datalogger, Ahlborn, Germany).

4.4 Tutkimuksessa suoritettut mittaukset

Tutkimuksessa tutkittavat pellot lennettiin läpi dronella ja siihen kiinnitetyllä lämpökameralla. Dronen lämpökameran ja maaperäskannerin yhteiskuvaukset suoritettiin vain osasta tutkittavia peltoja huonojen sääolosuhteiden vuoksi. Kuvaukset suoritettiin 4.5.-18.5.2022 vaihtelevasti kello 12 ja

18 välisenä aikana. Ennen ilmakuvauksen alkua droneen ladattiin autopilottinen lentosuunnitelma, joka oli tehty aikaisemmin Mission Planner -ohjelmalla (Ardupilot 2021) (kuva 8.). Ennen jokaisen ilmakuvauksen alkua otettiin droneen kiinnitetyn lämpökameran avulla kalibrointikuva vesiasiasta. Dronea pidettiin tällöin kädessä vesiasian yläpuolella, jolloin kameran korkeus astiaan oli noin yksi metri. Lämpötila mitattiin samaan aikaan sekä Flir käsikäyttöisellä lämpömittarilla, että Ahlbornin mittarilla. Jokaisesta koelohkosta mitattiin lennon aikana tai välittömässä läheisyydessä GCP-pisteiden läheltä kontrollilämpötilat maasta edellä kuvatuilla lämpötilamittareilla.

Lentotehtävässä kuvien overlap-arvoksi asetettiin 80 prosenttia ja kuvanottoväliksi yksi sekunti. Koelohkoon sijoitettiin kolmesta neljään kappaletta GCP-pisteitä pellon koosta riippuen, joiden avulla ilmasta otetut lämpökuvat voitiin kohdistaa koordinaatistossa oikein kuvankäsittelyvaiheessa Pix4D-ohjelmalla. GCP-pisteiden tarkka sijainti selvitettiin käyttämällä RTK-asemaa (U-blox, Sveitsi), joka oli rakennettu aikaisemmassa tutkimusprojektissa. GCP-pisteiden merkkeinä käytettiin 34 cm * 50 cm kokoisia alumiinisia levyjä (kuva 9.).



Kuva 8. Esimerkki yhdestä Mission Plannerilla suunnitellusta lentotehtävästä. Kuva: Juha Jokiniemi.



Kuva 9. GCP-piste pellon reunassa. Kuva: Lauri Arkkola.

4.5 Tutkimuksessa käytetyt laskentakaavat

Tutkimuksessa käytettiin korrelaatioiden laskemiseen Pearsonin korrelaatiokerrointa (kaava 1). Selitysteiden laskemiseen Pearsonin korrelaatiokerroin korotettiin toiseen (kaava 2). Keskineliövirheen laskemiseen käytettiin kaavaa 3. Lämpötilan muuttamiseen lämpökuvista celsiusasteiksi käytettiin yksinkertaista muunnosta (kaava 4).

$$\text{Pearsonin korrelaatio} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 * \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

$$\text{Selitysaste} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 * \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right)^2 \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (3)$$

, joissa

n kuvaa havaintojen lukumäärää

x_i kuvaa itsenäistä muuttujaa

y_i kuvaa riippuvaista muuttujaa

\bar{y} ja \bar{x} kuvaavat x_i :n ja y_i :n keskiarvoja

\hat{y}_i on muuttujan y_i ennustettu arvo, joka on saatu laskemalla regressioyhtälön avulla

$$\text{Lämpötilan muuttaminen celsiusasteiksi} = L_{\text{wir}} - 0,04 * 273,15 \quad (4)$$

, jossa

L_{wir} = kameran pikselin arvo (Flir 2017).

5 TULOKSET

5.1 Koepäivinä mitatut olosuhteet

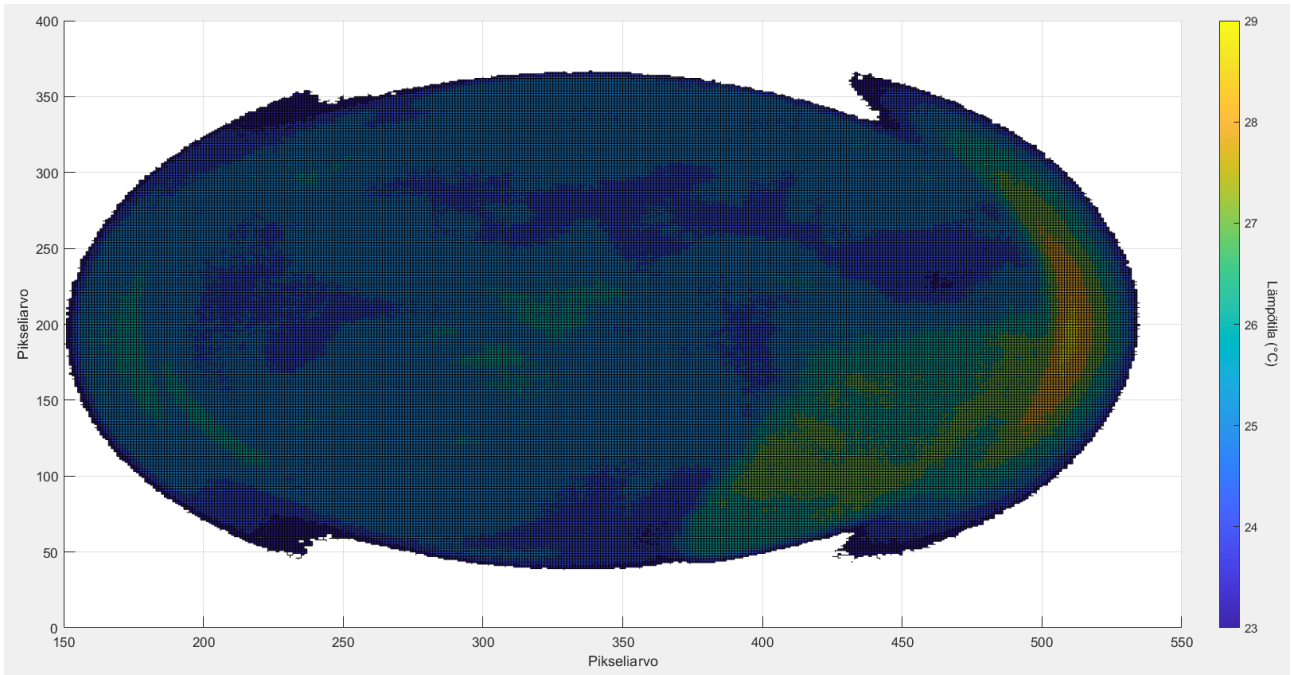
Koepäivinä mitattiin neljää eri olosuhdetta. Olosuhteiden mittauksessa pilvisuus määriteltiin silmämääräisesti ja ilman lämpötila sekä tuulen nopeus ja ilmankosteus mittareita hyödyntäen (taulukko 2).

Taulukko 2. Jokaisen kuvauspäivän keskimääräiset kuvausolosuhteet.

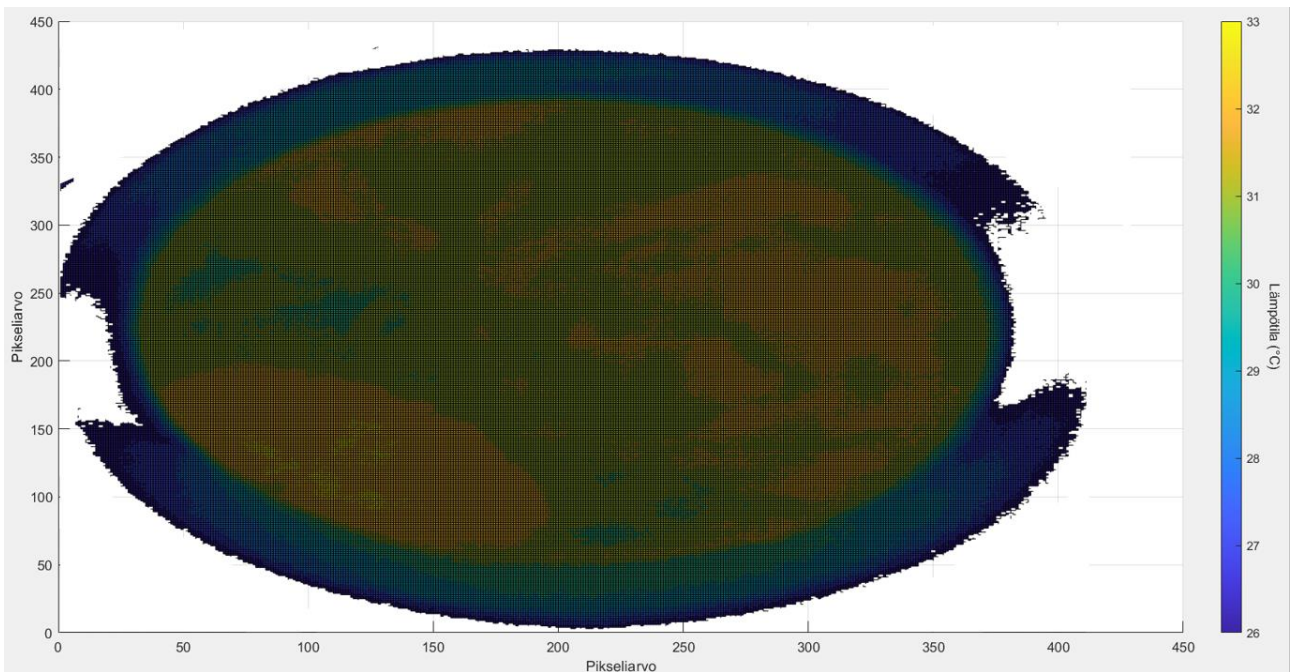
Päivämäärä	Kuvauskohde	Ilmankosteus (%RH)	Tuuli (m/s)	Ilman lämpötila (° C)	Pilvisuus
4.5.2022	Nurmi, ei vielä kasvussa	42	2,3	11,4	Puolipilvinen
6.5.2022	Nurmi, ei vielä kasvussa	45	1,5	16,1	Selkeä
6.5.2022	Kultivoitu	59	1,4	16,0	Selkeä
9.5.2022	Nurmi, kasvu alkanut	62	3,1	15,5	Puolipilvinen
18.5.2022	Kynnös	33	5,2	16,1	Selkeä

5.2 Lämpökameran kalibrointi

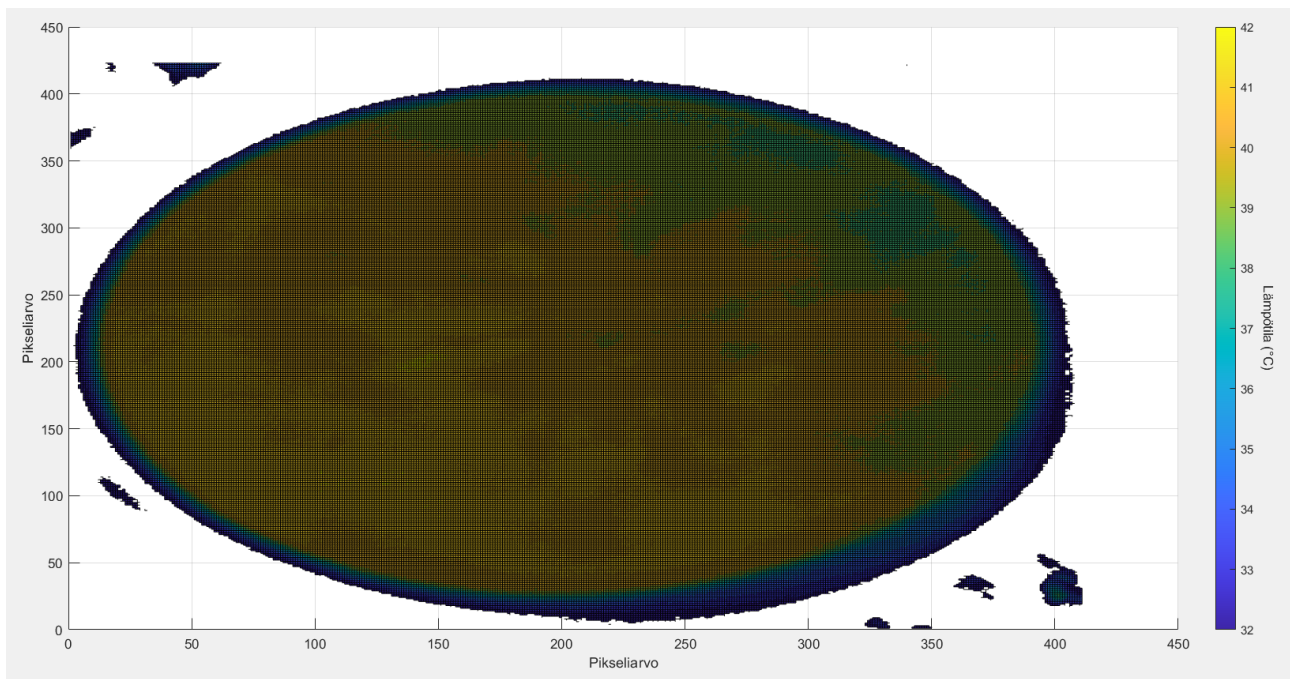
Ennen jokaista kuvauslentoa otettiin dronen lämpökameralla kuva vesiastiasta, jonka lämpötila määritettiin jokaisella kerralla erikseen. Kuvia pyrittiin rajaamaan siten, että vain ämpärissä oleva vesi jäisi kuvaan (kuvat 10–14). Jokaisen mittauskerran veden lämpötilat mitattiin Almemon käsimittarilla, flir käsikameralla ja dronen lämpökameralla (taulukko 3). Almemon anturin arvo mitattiin suunnilleen ämpärin keskeltä mahdollisimman pinnasta, jotta vertailu lämpökameran kanssa olisi todennukaisiin. Joidenkin kuvien kohdalla lämpötilaskaalan väritys ei kunnolla erotu, koska vierekkäisten pikselien arvot ovat hyvin kaukana toisistaan (kuva 10).



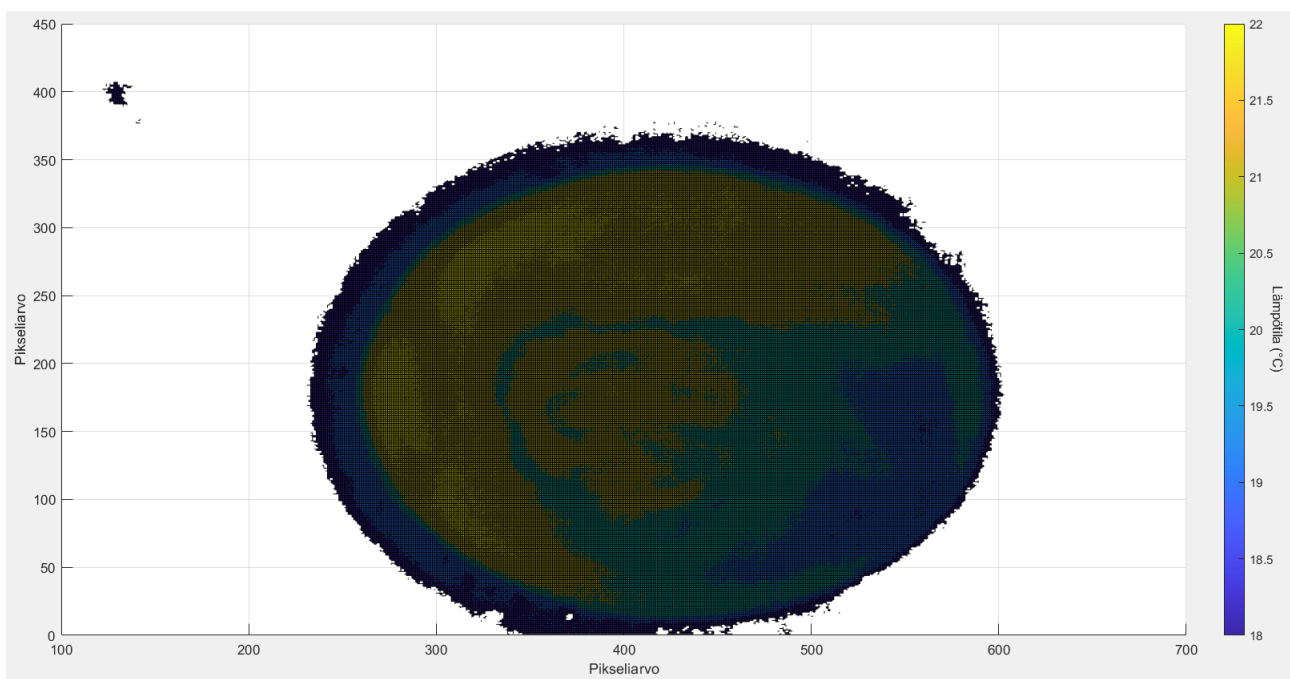
Kuva 10. Kalibrointiämpärin lämpötilakuva 4.5. suoritetulla lennolla nurmikasvustossa (Alaniitty 1). Kuvaan rajattu vain kaikki yli 23 asteiset pikselit. Kuva: Juha Jokiniemi.



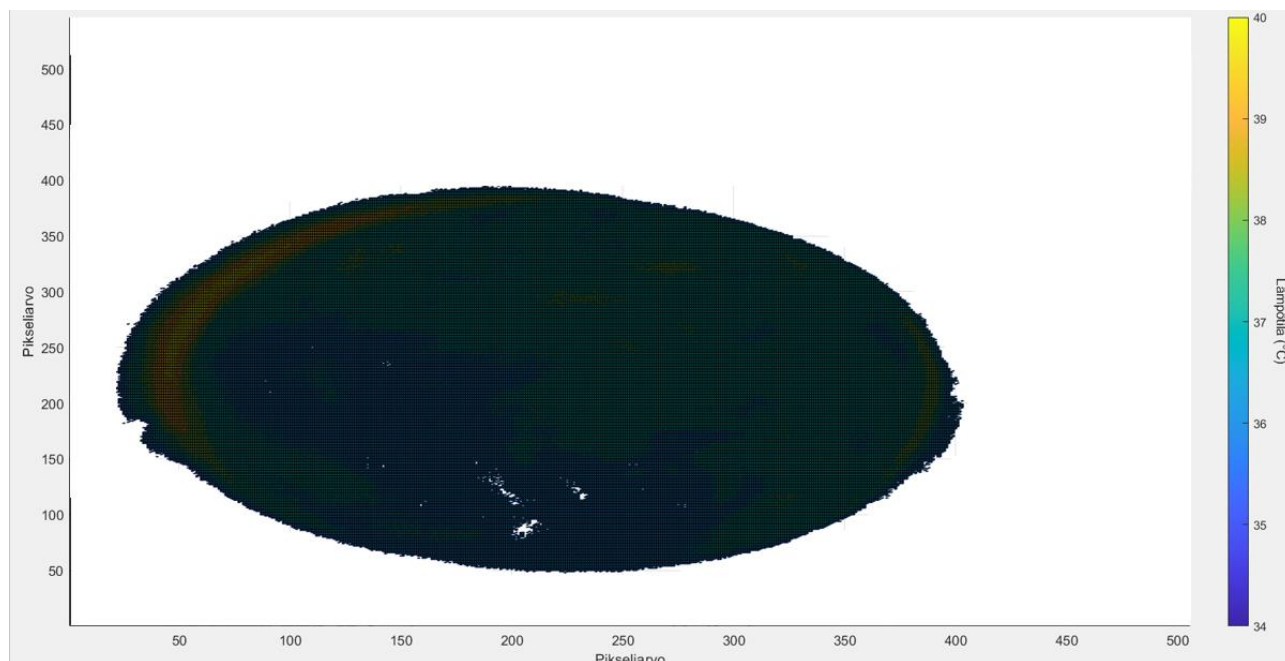
Kuva 11. Kalibrointiämpärin lämpötilakuva 6.5. lennolla nurmikasvustossa (Alaniitty 1). Kuvaan rajattu vain yli 26 asteiset pikselit. Kuva: Juha Jokiniemi.



Kuva 12. Kalibrointiämpärin lämpötilakuva 6.5. suoritetulla lennolla kultivoidulla pellolla (Mehiläis-saari). Kuvaan rajattu vain kaikki yli 32 asteiset pikselit. Kuva: Juha Jokiniemi.



Kuva 13. Kalibrointiämpärin lämpötilakuva 9.5. suoritetulla lennolla nurmikasvustossa (Alaniitty 2). Kuvaan rajattu vain yli 18 asteiset pikselit. Kuva: Juha Jokiniemi



Kuva 14. Kalibrointiämpärin lämpötilakuva 18.5. suoritetulla lennolla kynnöspellolla (Isoniitty). Kuvaan rajattu vain kaikki yli 34 asteiset pikselit. Kuva: Juha Jokiniemi

Taulukko 3. Lämpötilatulokset käsimittareilla ja dronen lämpökameralla sekä niiden mahdolliset eroavaisuudet. Negatiivinen luku tarkoittaa dronen lämpökameran antaneen todellista suuremman arvon.

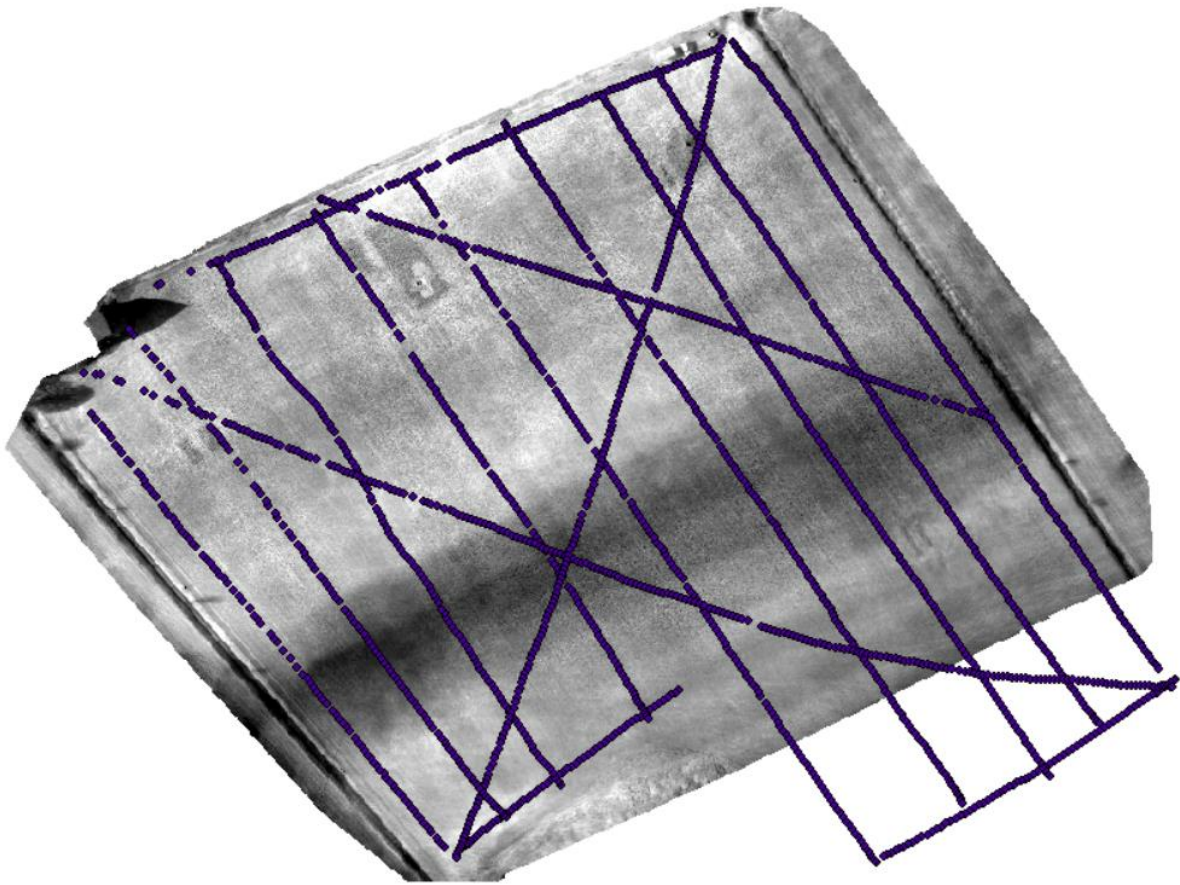
Kuvauspäivä	Lämpökamera (° C)	Flir käsikamera (° C)	Almemo (° C)	Almemo-lämpökamera erotus (° C)	Flir-lämpökamera erotus (° C)
4.5.2022 nurmi (Alaniitty 1)	24	Ei tulosta	24	0	-
6.5.2022 kultivoitu (Mehiläissaari)	40	34,6	38,8	-1,2	-5,4
9.5.2022 nurmi (Alaniitty 2)	21	19,4	22,8	1,8	-1,6
18.5.2022 kynnös (Isoniitty)	38	35,6	38,5	0,5	-2,4

Kameran ja käsimittarin lämpötilojen erotus laskettiin jokaiselle mittaukselle erikseen, jotta voitiin selvittää, onko ero suunnilleen yhtä suuri jokaisen mittauksen kohdalla. Lämpötilan erotus laskettiin vähentämällä aina lämpökameran antama arvo Almemon lämpömittarin arvosta tai Flir käsikameran

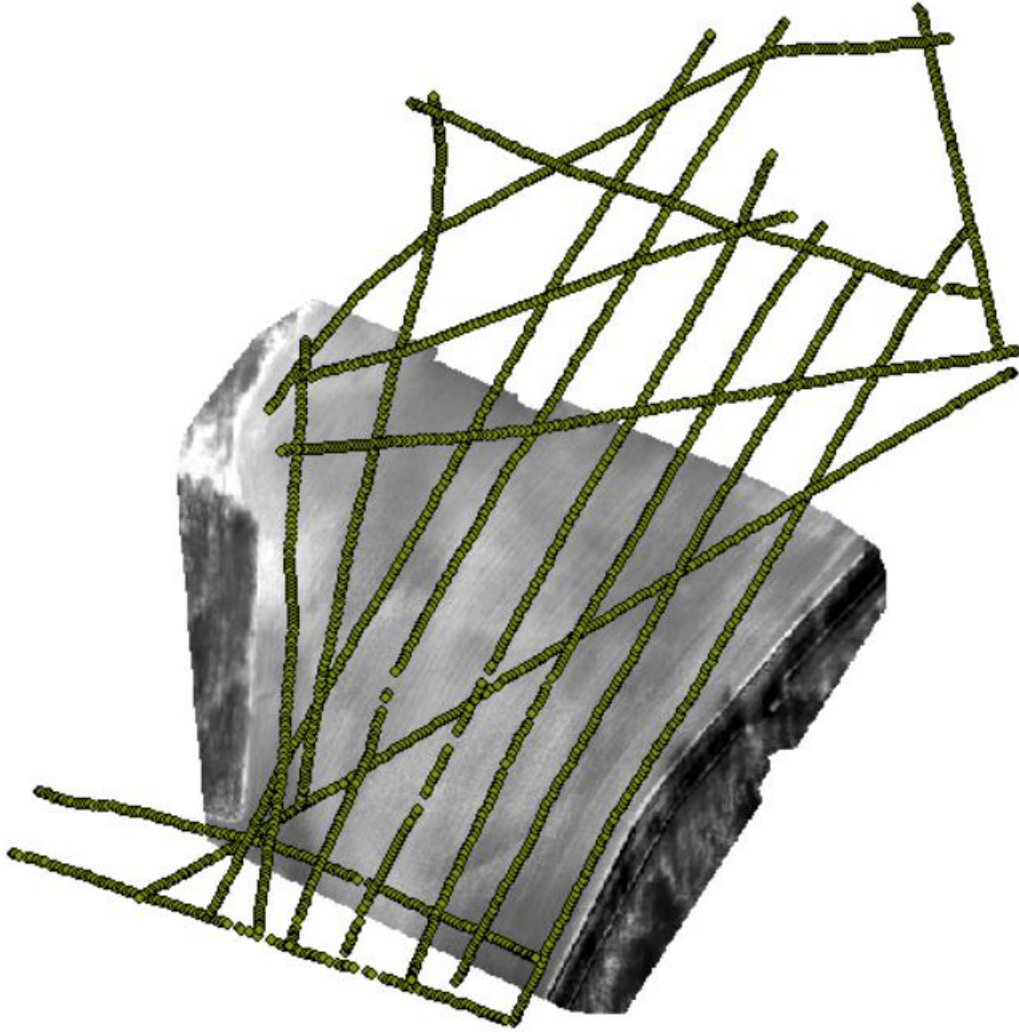
antamasta arvosta. Lämpötilojen keskimääräiseksi erotusarvoksi saatiin 0,025 celsiusastetta Ahlbor-
nin anturin kanssa ja -3,6 celsiusastetta Flir käsikameran kanssa. Negatiivinen laskutulos tarkoitti sitä,
että dronen lämpökamera näytti suurempaa arvoa, kuin mitä vertailukäytössä oleva mittari.

5.3 Maaperäskannerilla saadut tulokset

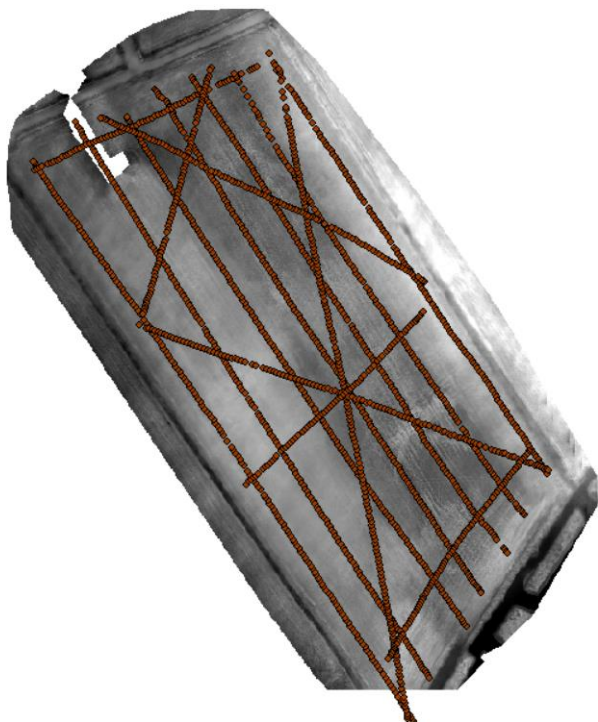
Maaperäskannerin antamasta datasta saatiin muodostettua pistekartta mitatusta alueesta (kuvat 15–
17). 4.5. tehdyssä skannauksessa saatuja mittapisteitä jouduttiin korjaamaan GPS-virheen vaikutuk-
sen vuoksi, jotta kuvista voitiin suoraan analysoida maan lämpötilaa samoista pisteistä. 6.5. ja 9.5.
tehdyissä skannauksissa virhettä ei enää ilmaantunut. Kaikissa kuvissa skannerin antamat pisteet ulot-
tuvat kuvatun alueen ulkopuolelle, koska lämpökameralla ei kuvattu koko peltoa. Skannerin valmis-
tajan tarjoamasta pilvipalvelusta saatiin ladattua myös lämpötilakartat skannerilla ajetuista pelloista.
Lämpötila on jaettu alueisiin, eikä alueiden lämpötilaväleihin voinut vaikuttaa. Lisäksi lämpötilat
olivat fahrenheitasteina, jotka jouduttiin muuttamaan käsin celsiusasteiksi (kuvat 18–20). Kuvissa on
myös huomattava se, että skanneri mittaa lämpötilaa maan alta, jolloin myös lämpötilat ovat mata-
lammat verrattuna dronen lämpökameran antamiin tuloksiin. Dronen lämpökameran ja maaperäskan-
nerin välisten keskiarvolämpötilojen eroksi saatiin 3,4 astetta (taulukko 6).



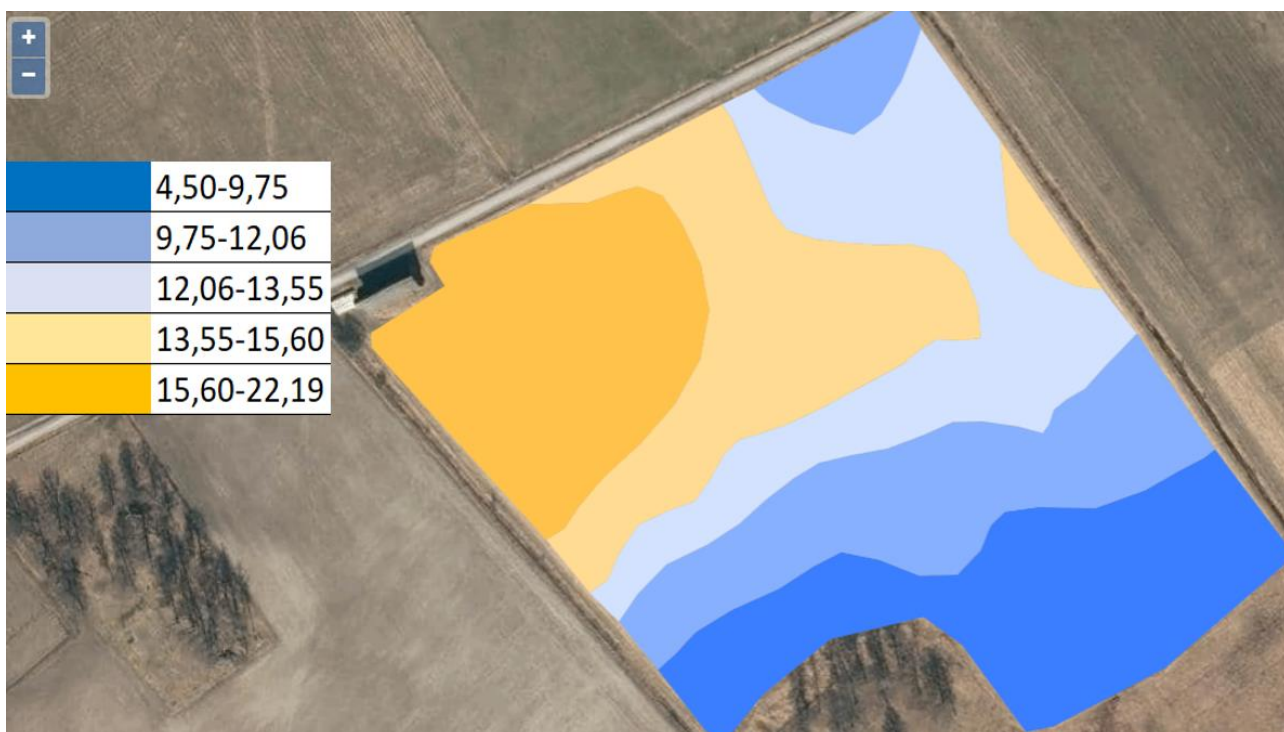
Kuva 15. Skannerin antama pistekartta 4.5. tehdyssä mittauksessa (Alaniitty 1). Kuva sovitettu lämpökameralla saatujen kuvien muodostaman ortomosaiikkikuvan päälle. Kuva: Juha Jokiniemi



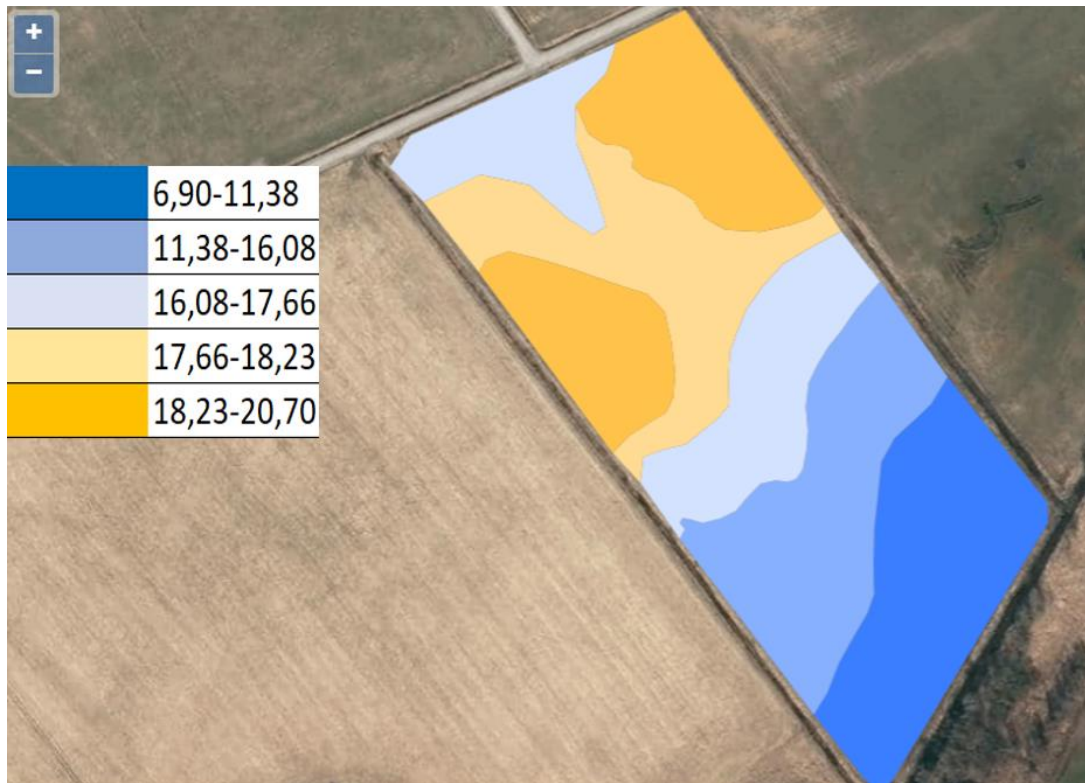
Kuva 16. Skannerin antama pistekartta 6.5. tehdyssä mittauksessa (Mehiläissaari). Kuva sovitettu lämpökameralla saatujen kuvien muodostaman ortomosaiikkikuvan päälle. Kuva: Juha Jokiniemi



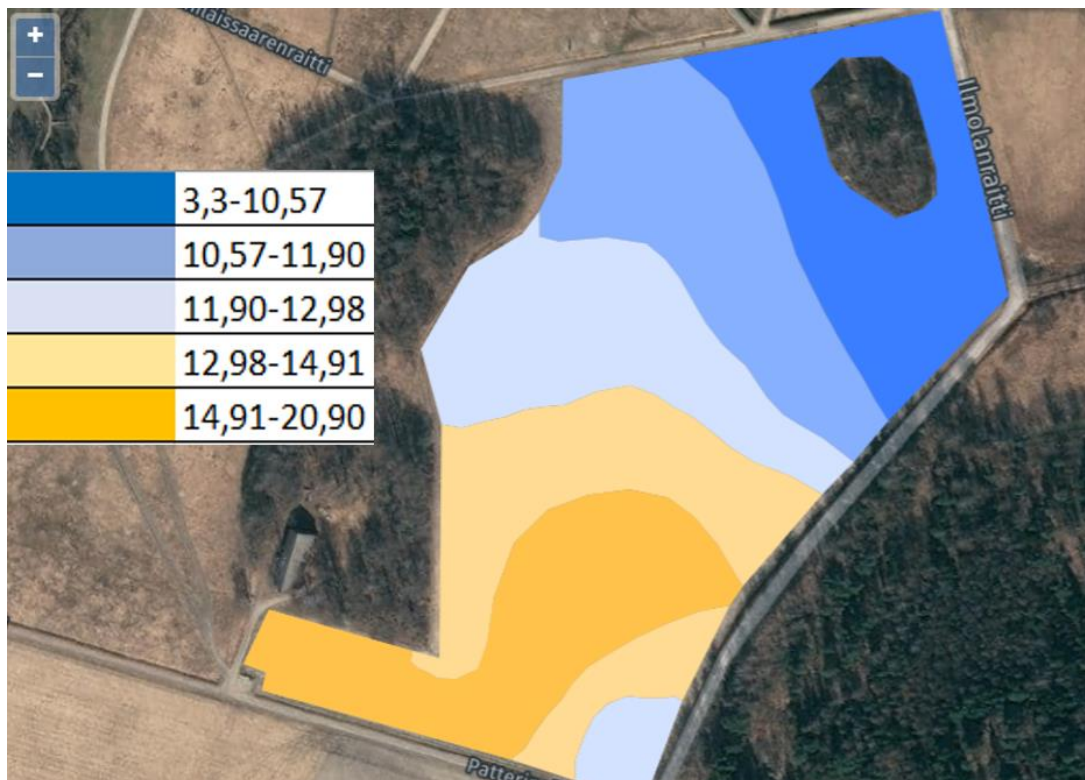
Kuva 17. Skannerin antama pistekartta 9.5. tehdyssä mittauksessa (Alaniitty 2). Kuva sovitettu lämpökameralla saatujen kuvien muodostaman ortomosaiikkikuvan päälle. Kuva: Juha Jokiniemi



Kuva 18. Skannerin pilvipalvelun antama lämpötilakartta mitatusta alueesta (Alaniitty 1). Lämpötila celsiusasteina. Kuva: Antti Lajunen, muokannut: Juha Jokiniemi



Kuva 19. Skannerin pilvipalvelun antama lämpötilakartta mitatusta alueesta (Alaniitty 2). Lämpötila celsiusasteina. Kuva: Antti Lajunen, muokannut: Juha Jokiniemi



Kuva 20. Skannerin pilvipalvelun antama lämpötilakartta mitatusta alueesta (Mehiläissaari). Lämpötila celsiusasteina. Kuva: Antti Lajunen, muokannut: Juha Jokiniemi

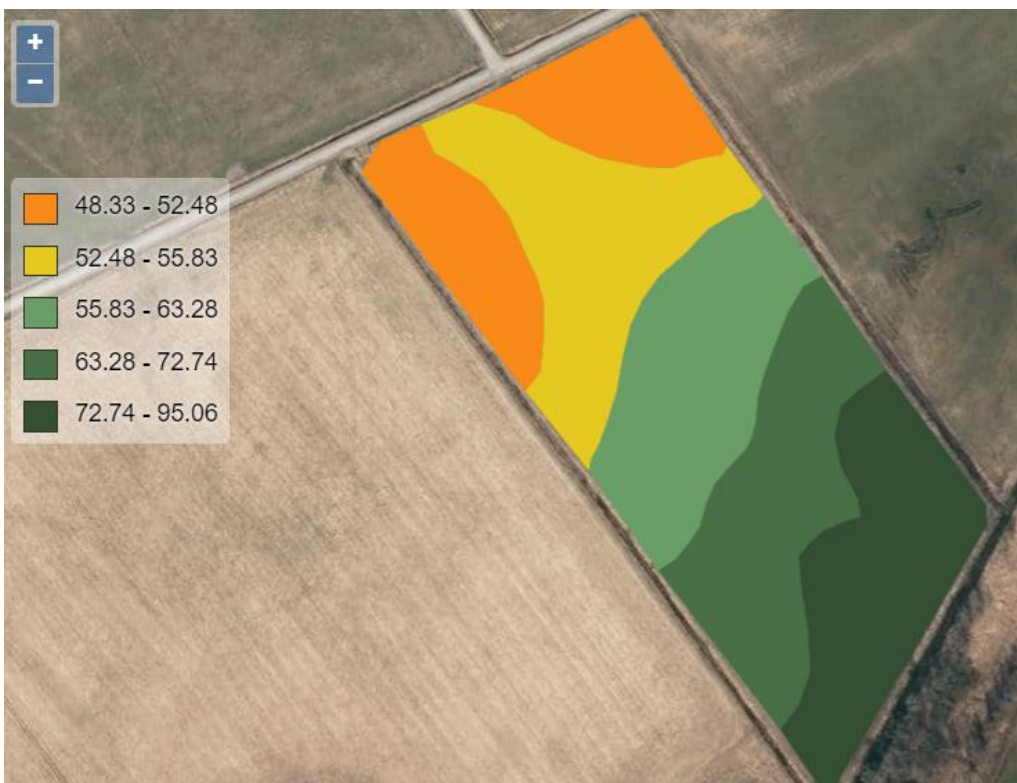
Skannerilla mitatuista tuloksista saatiin myös koostettua pilvipalvelussa kosteuskartta samaan tapaan, kuin lämpötilasta (kuvat 21–23). Kosteus on kuvissa merkitty vaihteluväleillä, eikä tässäkään tapauksessa välien suuruuteen voinut vaikuttaa. Kosteus näkyi kartoissa suunnilleen oikein verrattuna silmämääräisiin havaintoihin kuvauksia tehtäessä.



Kuva 21 Skannerin pilvipalvelun antama kosteuskartta 4.5. mitatusta alueesta (Alaniitty 1). Kuva: Antti Lajunen.



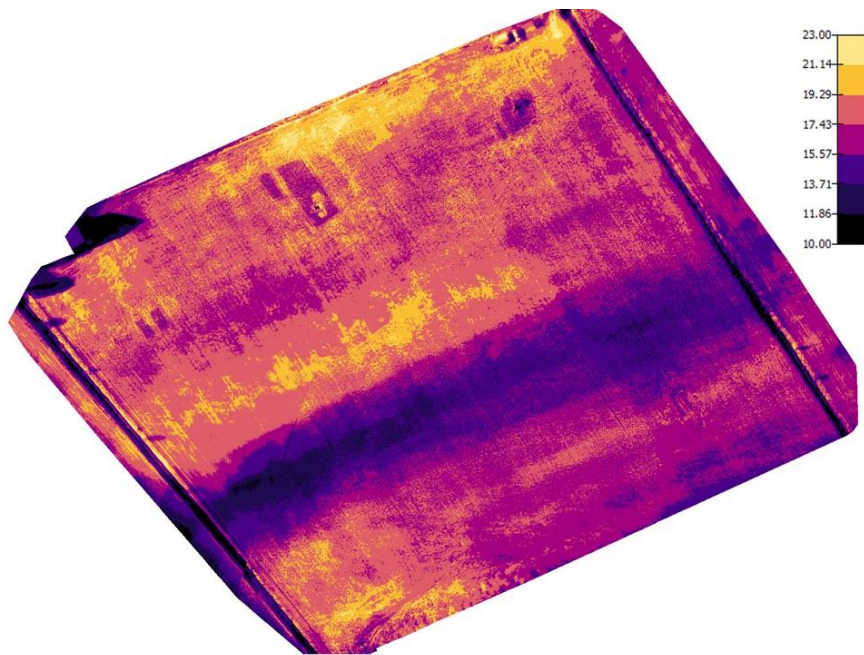
Kuva 22. Skannerin pilvipalvelun antama kosteuskartta 6.5. mitatusta alueesta (Mehiläissaari). Kuva: Antti Lajunen.



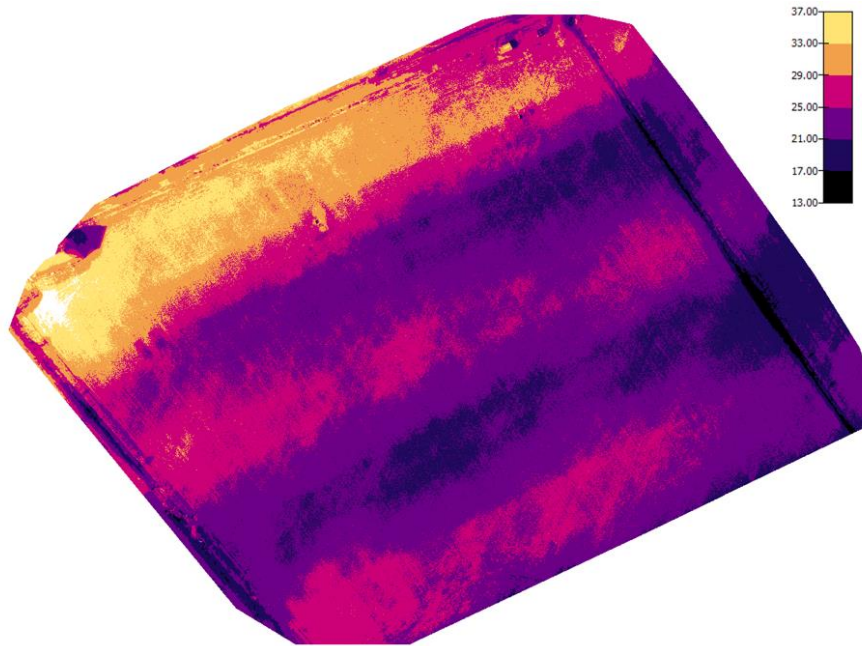
Kuva 23. Skannerin pilvipalvelun antama kosteuskartta 9.5. mitatusta alueesta (Alaniitty 2). Kuva: Antti Lajunen.

5.4 Lämpökameralla saadut lämpökartat

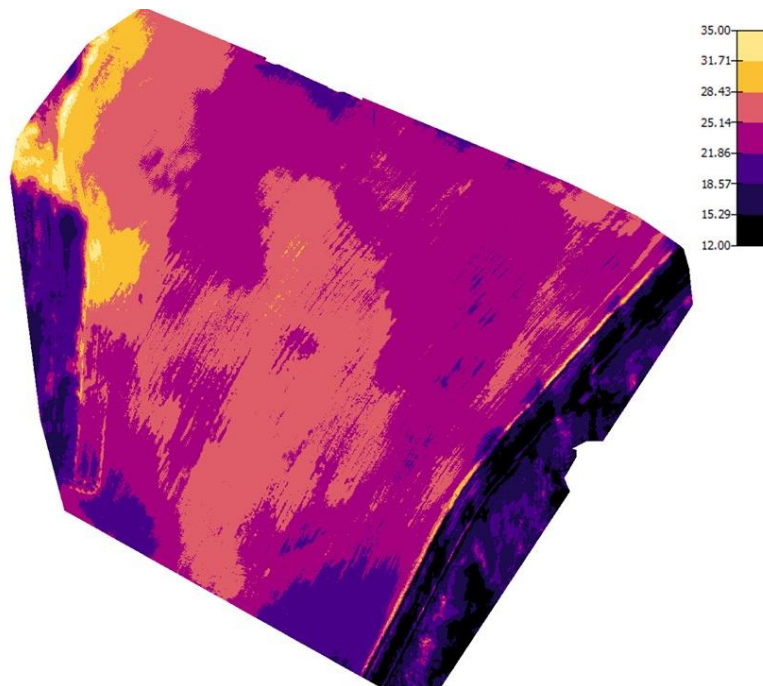
Dronella suoritettujen lentojen aikana kameran ottamista kuvista saatiin muodostettua ortomosaiikkikuvat (kuvat 24–28). Kuvissa tummemmat alueet kuvaavat kylmempiä lämpötiloja ja vaaleammat kuumempia. Jokaisessa kuvassa on merkitty lämpötilaskaala erikseen, koska kuvauspäivien olosuhteet olivat erilaiset ja maa heijasti lämpöä joka kuvauskerralla eri voimakkuudella. Joissakin lämpökuvissa ortomosaiikkikuvan muodostus epäonnistui tuntemattomasta syystä (kuva 27).



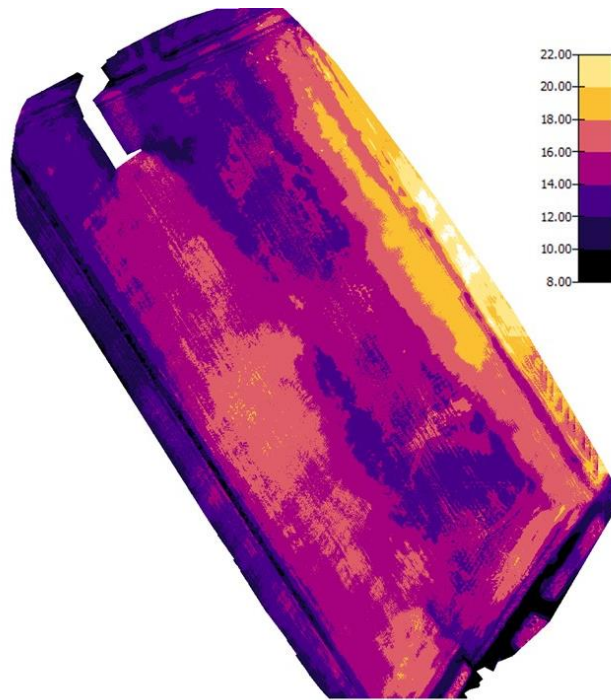
Kuva 24. Dronen lämpökameran kuvien avulla muodostettu ortomosaiikkikuva juuri kasvuun lähteneestä nurmipellosta 4.5.2022 (Alaniitty 1). Nurmen kasvuaste BBCH-asteikolla alle 12. Vaaleampi väri kuvastaa kuumempaa lämpötilaa. Alkuperäinen kuva: Mikael Änäkkälä, muokannut: Juha Jokiniemi.



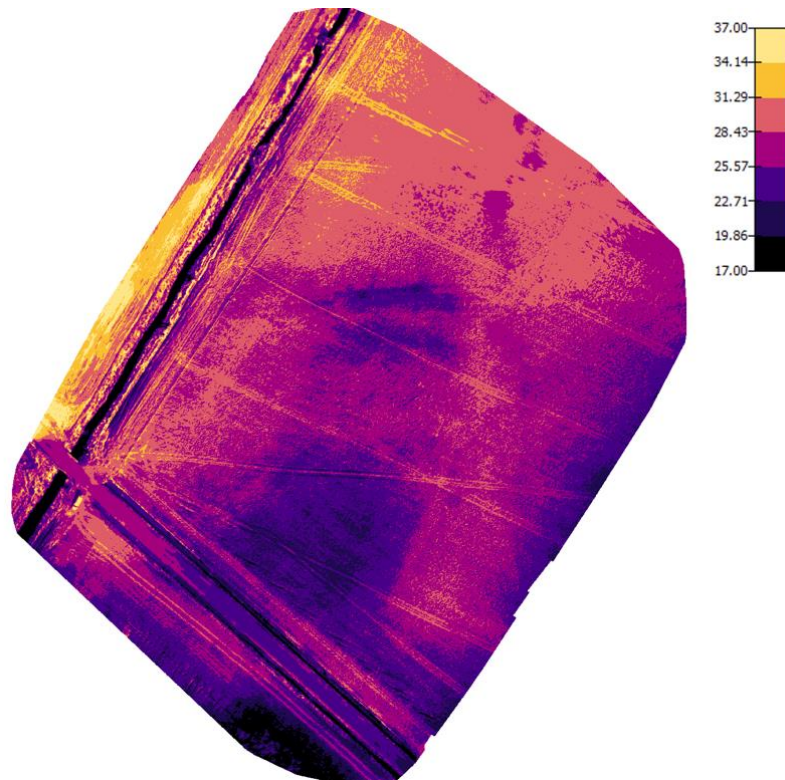
Kuva 25. Dronen lämpökameran kuvien avulla muodostettu ortomosaiikkikuva nurmipellosta 6.5.2022 (Alaniitty 1). Vaaleampi väri kuvastaa kuumempaa lämpötilaa. Nurmen kasvuaste 12–13 BBCH-asteikolla. Alkuperäinen kuva: Mikael Änäkkälä, muokannut: Juha Jokiniemi.



Kuva 26. Dronen lämpökameran kuvien avulla muodostettu ortomosaiikkikuva kultivoidusta pellostä 6.5.2022 (Mehiläissaari). Vaaleampi väri kuvastaa kuumempaa lämpötilaa. Alkuperäinen kuva: Mikael Änäkkälä, muokannut: Juha Jokiniemi.



Kuva 27. Dronen lämpökameran kuvien avulla muodostettu ortomosaiikkikuva nurmipellosta 9.5.2022 (Alaniitty 2). Vaaleampi väri kuvastaa kuumempaa lämpötilaa. Nurmen kasvuaste 12–13 BBCH-asteikolla. Alkuperäinen kuva: Mikael Änäkkälä, muokannut: Juha Jokiniemi.



Kuva 28. Dronen lämpökameran kuvien avulla muodostettu ortomosaiikkikuva kynnetystä pellostä 18.5.2022 (Isoniitty). Vaaleampi väri kuvastaa kuumempaa lämpötilaa. Alkuperäinen kuva: Mikael Änäkkälä, muokannut: Juha Jokiniemi.

GCP-pisteiden läheisyydestä maasta mitattiin lämpötilat kolmesta eri kohdasta. Poikkeuksena maaperäskannerin ja lämpökameran datan vertailussa lämpötilat mitattiin pelloista tietyistä valikoiduista pisteistä, joissa lämpökuvista muodostettu ortomosaiikkikuva oli tarkin (taulukko 6). Mitattaessa maasta kontrollilämpötilat Flir-käsikameralla, oli ilmasta saatujen lämpötilapisteiden ja maan välillä paljon enemmän hajontaa verrattuna Ahlbornin anturiin (taulukko 5). Ensimmäisessä mittauksessa maasta ja ilmasta saatujen tulosten välille tuli suurin ero, koska sää ei ollut kameralle sopiva (taulukko 4). Ahlbornin mittarilla mitattuna lämpökamera näytti keskimäärin 3,5 celsiusastetta enemmän, kuin mitä maasta mitattiin (taulukko 4). Kuvattavien peltojen järjestys oli jokaisessa asetelmassa seuraava: Alaniitty1, Mehiläissaari, Alaniitty 2 ja Isoniitty (taulukot 4 ja 5). Viimeisessä koeasetelmassa Isoniitty ei ollut mukana mittauksessa (taulukko 6).

Taulukko 4. Maan ja lämpökameran antamat lämpötilat kontrollipisteistä 1–4. Maa-sarakkeessa kerrotut lämpötilat on mitattu Ahlbornin anturilla ja Ilma-sarakkeessa kerrotut lämpötilat on saatu dronen lämpökameran ortomosaiikkikuvasta. Peltojen järjestys ylhäältä alas kasvustoittain seuraava: Alaniitty1, Mehiläissaari, Alaniitty 2 ja Isoniitty.

	Maa1 (° C)	Ilma1 (° C)	Maa2 (° C)	Ilma2 (° C)	Maa3 (° C)	Ilma3 (° C)	Maa4 (° C)	Ilma4 (° C)
Nurmi 1	8,7	17,8	9,0	13,5	8,8	15,2	9,2	18,8
Nurmi 1	9,1	17,8	9,2	14,0	9,0	15,5	9,2	18,5
Nurmi 1	9,2	18,3	9,3	15,2	9,1	16,9	9,4	18,9
Kultivoitu	20,1	22,9	23,0	30,3	20,9	22,3	-	-
Kultivoitu	21,0	22,9	24,9	30,0	21,3	22,5	-	-
Kultivoitu	22,3	22,8	25,4	29,6	22,9	23,2	-	-
Nurmi 2	20,3	19,1	17,3	12,9	15,9	13,8	-	-
Nurmi 2	19,6	19,1	20,0	12,7	18,1	14,2	-	-
Nurmi 2	18,8	18,5	20,3	12,6	17,6	14,6	-	-
Kynnös	18,5	22,8	18,8	27,7	25,4	23,5	23,4	26,6
Kynnös	16,7	22,5	22,4	26,3	15,8	24,6	21,8	26,8
Kynnös	17,4	23,7	22,1	29,4	21,8	24,2	20,8	25,8

Taulukko 5. Maan ja lämpökameran antamat lämpötilat kontrollipisteistä 1–4. Maa-sarakkeessa kerrotut lämpötilat on mitattu Flir-käsilämpökameralla ja Ilma-sarakkeessa kerrotut lämpötilat on saatu dronen lämpökameran ortomosaiikkikuvasta. Peltojen järjestys ylhäältä alas kasvustoittain seuraava: Alaniitty1, Mehiläissaari, Alaniitty 2 ja Isoniitty.

	Maa1 (° C)	Ilma1 (° C)	Maa2 (° C)	Ilma2 (° C)	Maa3 (° C)	Ilma3 (° C)	Maa4 (° C)	Ilma4 (° C)
Nurmi 1	19,2	18,1	19,8	13,7	15,5	15,2	18,6	19,2
Nurmi 1	24,6	17,2	25,8	14,2	20,4	15,5	20,9	18,4
Nurmi 1	26,3	17,5	31,2	13,5	24,9	16,9	31,5	18,2
Kultivoitu	20,1	22,9	21,4	30,3	22,1	22,3	-	-
Kultivoitu	23,1	22,9	25,8	30,0	23,4	22,5	-	-
Kultivoitu	23,5	22,8	30,1	29,6	24,1	23,2	-	-
Nurmi 2	14,9	19,1	14,4	12,9	16,1	13,8	-	-
Nurmi 2	17,6	19,1	18,9	12,7	15,3	14,2	-	-
Nurmi 2	18,8	18,5	17,5	12,6	13,3	14,6	-	-
Kynnös	18,2	22,8	20,1	27,7	10,8	23,5	20,6	26,6
Kynnös	16,4	22,5	28,5	26,3	15,0	24,6	23,2	26,8
Kynnös	17,8	23,7	19,5	29,4	27,5	24,2	18,1	25,8

Taulukko 6. Maan ja lämpökameran antamat lämpötilat kontrollipisteistä 1–4. Maa-sarakkeessa kerrotut lämpötilat on saatu maaperäskannerilla ja Ilma-sarakkeessa kerrotut lämpötilat on saatu dronen lämpökameran ortomosaiikkikuvasta. Peltojen järjestys ylhäältä alas kasvustoittain seuraava: Alaniitty1, Mehiläissaari ja Alaniitty 2.

	Maa1 (° C)	Ilma1 (° C)	Maa2 (° C)	Ilma2 (° C)	Maa3 (° C)	Ilma3 (° C)	Maa4 (° C)	Ilma4 (° C)
Nurmi 1	14,7	18,3	14,5	15,5	20,8	18,5	13,5	17,6
Nurmi 1	14,9	18,2	14,0	15,3	20,3	17,7	13,5	19,1
Nurmi 1	15,1	18,0	13,8	15,1	19,9	15,6	13,7	17,9
Kultivoitu	15,1	25,0	18,6	27,4	10,8	20,8	11,0	30,4
Kultivoitu	15,2	25,1	18,7	23,9	10,9	20,9	10,7	31,3
Kultivoitu	15,2	24,2	18,9	25,3	11,0	20,8	10,3	30,1
Nurmi 2	19,4	14,0	19,8	14,6	2,7	12,6	16,4	13,0
Nurmi 2	18,6	14,8	20,0	14,8	2,5	13,1	16,4	13,6
Nurmi 2	17,8	14,4	20,1	14,6	2,4	13,1	16,4	13,3

5.5 Maan ja ilman väliset tilastolliset kertoimet

Jokaisesta mittausmenetelmästä laskettiin Pearsonin korrelaatiokerroin (r), selitysaste (r^2), keskineliövirhe (RMSE) ja tilastollinen merkitsevyys (p-arvo)(taulukko 7). Suurimman selitysasteen antoi Almemon anturin ja dronen lämpökameran käyttäminen (0,45). Huonoimman selitysasteen puolestaan antoi maaperäskannerin ja dronen lämpökameran käyttäminen (0,01).

Taulukko 7. Eri menetelmien tilastolliset arvot maasta ja ilmasta otettujen lämpötilojen välillä.

	Almemo	Flir	Skanneri
r	0,67	0,22	-0,11
r^2	0,45	0,05	0,01
RMSE	4,16	5,08	3,69
p-arvo	0,00	0,44	0,00

6 TULOSTEN TARKASTELU

6.1 Maan lämpötilojen vertailu eri menetelmillä

Bendig ym. (2012) ja Sagan ym. (2019) tutkivat kumpikin omassa tutkimuksessaan ilmasta otettujen lämpökuvien käyttökelpoisuutta saman kasvin eri lajikkeiden vertailussa. Molemmat saivat aikaan

eroja, mutta ne olivat hyvin pieniä koko tutkittavalla alueella. Sagan ym. (2019) käyttivät tutkimuksessaan lähes samaa lämpökameraa (Flir Vue Pro R 640), kuin omassa tutkimuksessani oli käytössä. Molemmissa tutkimuksissa lentokorkeus ja overlap-arvo olivat myös hyvin lähellä tämän tutkimuksen arvoja, joten suurimmat muuttujat tutkimuksissa olivat ilman aiheuttama lämpökuvan vääristyminen ja kasvuston mahdollinen epätasalaatuisuus sekä ihmisestä johtuvat mittausvirheet.

Sekä Bendig ym. (2012), että Sagan ym. (2019) tutkimuksissa lämpökameran antamat arvot olivat vähän suurempia verrattuna maasta mitattuihin vastaaviin arvoihin. Omassa tutkimuksessani dronen lämpökamera näytti Ahlbornin mittarilla mitattuihin arvoihin nähden muutaman asteen enemmän, kun taas Flir käsilämpökameraa käytettäessä eroa ei keskimäärin juurikaan ollut, vaikka yksittäisissä tapauksissa ero saattoi olla jopa yli kymmenen astetta. Maaperäskanneria käytettäessä keskiarvollisesti eroa oli saman verran, kuin Ahlbornin anturilla mitattaessa. Ahlbornin anturilla mitattaessa yksi suuri vaikuttava tekijä keskiarvoeron suuruuteen oli ensimmäisen kuvauspäivän epäotolliset olosuhteet. Silloin sää oli pilvinen, kun muissa mittauksissa se oli selkeä. Mittauspäivänä 4.5. auringon säteilymäärän suuruus vaikutti anturiin eri tavalla, koska suoran auringon lämpösäteilyn määrä oli huomattavasti pienempi pilvisyydestä johtuen. Huomion vahvisti myös se, että laitettaessa Ahlbornin anturin eteen varjo muina mittauspäivinä, muuttui anturin näyttämä lämpötila useilla asteilla. Muissa mittauksissa eroa oli muutamia asteen kymmenyksiä tai aste suuntaansa. Tästä voidaan myös päätellä, että ilman vääristävä vaikutus aiheutti virhettä, kuten Bendig ym. (2012) ja Sagan ym. (2019) tutkimuksissa.

Tutkittaessa tilastollisia arvoja Ahlbornin lämpötila-anturin kanssa dronen lämpökamera antoi puolestaan parhaimman selitysasteen, joka oli 0,45 keskineliövirheen ollessa $\pm 4,16$. Myös tilastollisesti tulos oli hyvin merkitsevä, sillä p-arvo oli paljon alle 0,001. Flir-käsilämpökameraa käytettäessä selitysaste oli vain 0,05, mikä on erittäin heikko, eikä tämän tutkimuksen perusteella edes tilastollisesti merkitsevä ($p > 0,05$). Näin huonoon selitysasteeseen suurin vaikuttava tekijä oli suurimmalla todennäköisyydellä epätarkkojen mittaustulosten saaminen, koska lämpötiloja mitattaessa oli mahdotonta kohdistaa kameraa yhteen kohtaan ilman jalustaa resoluution ollessa hyvin suuri läheltä mitattaessa. Parempaan tulokseen olisi päästy, jos kuvaus olisi suoritettu käsikameralla jalustan kanssa ja mittauspisteet olisi otettu RTK-tarkkuudella. Vaikka keskiarvo oli sekä Ahlbornin anturilla, että Flir-käsilämpökameralla lähes sama, ei yksittäinen mittaus kuitenkaan ollut tarkka.

Ortomosaiikkikuvista kosteiden kohtien tarkastelu ei ollut kaikissa tapauksissa suoraviivaista, koska lämpökameran kuvista jotkin kohdat näyttivät kylmemmiltä, vaikka ne olivatkin maaperäskannerin

mukaan kuvia (kuvat 21 ja 24). Tähän ei löytynyt muuta selitystä, kuin virheheijastus kuvaushetkellä, jonka ohjelma tulkitsevi kuvien yhdistysvaiheessa virheellisesti. Tämän perusteella voidaan tutkimuksessa käytetyn lämpökameran osalta todeta, että kosteuden määrittäminen maasta lämpökameralla ilmasta ei tuota aina tarkkaa lopputulosta. Tutkimuksessa ei pystytty tutkimaan sitä, vaikuttiko kasvuston kosteus lämpökuviiin siihen tarkoitettuun koeasetelman puuttuessa. Kosteuden vaikutusta kasvien lämpötilaan on tutkittu muissa tutkimuksissa ja eräässä tutkimuksessa lämpötilan vaihtelu kastelluiden ja kastelemattomien koeruutujen välillä oli noin 4,3 celsiusastetta (Berni ym. 2009).

Useat eri tutkimukset lämpötilojen mittaamisesta ilmasta keskittyivät erityisesti kasvien lämpöstressin havainnointiin ja sen satovaikutukseen. Eräässä tutkimuksessa tutkittiin soijapavun lämpöstressiä ja sitä, miten hyvin se voidaan erottaa dronella otetuista ilmakuvista. Tutkimuksessa oli käytössä lämpökamera, jonka erotustarkkuus oli 0,5 celsiusastetta ja pikseliresoluutio 160x120. Lopputuloksena tutkimuksessa oli, että lämpöstressi aiheutti kasvustoon 0,2–7,2 asteen eroja verrattuna täysin kasteltuun kasvustoon (Crusiol ym. 2019). Omassa tutkimuksessani kasvuston lämpöstressiä ei voitu tieteellisin perustein tutkia, koska koeasetelma ei ollut sen mukainen kastelemattoman ja kastellun kontrolliruudun puuttuessa. Suurimmat lämpötilaerot tekemässäni tutkimuksessa muodostuivat virheellisissä heijastuksissa, joita aiheuttivat muun muassa pellolla olleet GCP-pisteet ja rakennusten peltiset katot. Näissä kohdissa lämpötila oli dronen lämpökameran mukaan joko negatiivinen tai huomattavasti muuta ympäristöä korkeampi.

Tehdyssä tutkimuksessa dronen lämpökameran ja maaperäskannerin antamat tulokset erosivat toisistaan muutaman asteen verran. Tilastollisesti skanneriin verrattuna dronen lämpökamera antoi selityksasteeksi vain 0,01 keskivirheen ollessa $\pm 3,69$. Mittaustulos oli kuitenkin tilastollisesti merkitsevä ($p < 0,05$). Korrelaatiokertoimen ollessa negatiivinen, näyttää maaperäskanneri lähtökohtaisesti vähemmän, kuin mitä lämpökamera. Suurin selittävä tekijä tilastollisesti huonoon selityksasteeseen on se, että dronen lämpökamera mittaa lämpötilaa vain pinnasta, kun skanneri mittaa maan alta, jossa lämpötila ei vaihtele läheskään yhtä paljon (Beltrami & Kellman 2003). Negatiivinen korrelaatiokerroin on myös odotettu, koska maan lämpötila pinnan alapuolella on aina lähtökohtaisesti pintaa viileämpi (Beltrami & Kellman 2003).

Pohdittaessa kokonaiskuvaa ja tutkimuksen päämäärää, ei maaperäskannerin antama data ollut yhtä käyttökelpoista, koska se mittaa tietoja vain niistä kohdista, joista sillä ajetaan. Haluttaessa yhtä tarkka lämpötilakartta, mitä dronella saadaan, olisi skannerilla ajettava pelto läpi viiden senttimetrin välein. Tämä taas on käytännön kannalta täysin mahdotonta pellon pintaa ja kasvustoa polkematta.

Dronen lämpökameralla voidaan sen sijaan saada dataa käytännössä mistä kohtaa tutkittavaa kohdetta tahansa. Lämpökameran käytössä suurin rajoittava tekijä on sää, kun taas skannerilla voi ajaa lähes millaisessa säässä tahansa. Sateella ajo ei kuitenkaan ole suositeltavaa, koska kosteuden mittaus ei toimi silloin oikein ja pelto tiivistyy turhaan.

Maaperämittauksen ja droneen kiinnitettävän lämpökameran välillä on tehty joitakin tutkimuksia, mutta suurin osa keskittyy kasvien vesistressin tutkimiseen pelkän lämpötilan mittaamisen sijaan. Bellvert ym. (2014) tutkimuksessa tutkittiin viiniköynnöskasvuston vesistressiä. Heidän tutkimuksessaan lämpötila maan ja kasvien välillä vaihteli kuten hypoteesi ennusti. Kuivuudesta kärsivien kasvien ja maan välinen lämpötilaero oli selvästi pienempi verrattuna hyvin kasteltuihin kasveihin. Erotusarvot vaihtelivat useiden asteiden välillä. Tekemässäni tutkimuksessa maaperäskannerin antama lämpötila oli selvästi viileämpi kosteissa kohdissa verrattuna kuivempiin kohtiin (taulukko 6). Huomionarvoista oli se, että skannerin antaessa hyvin viileitä lämpötiloja antoi dronen lämpökamera lähes ilman lämpötilan kanssa samansuuntaisia tuloksia. Tästä voidaan taas päätellä, että suora auringonvalo aiheuttaa maan pintaan hyvin suuren lämpötilaeron verrattuna muutaman senttimetrin syvyydestä mitattuihin arvoihin.

Tässä tutkimuksessa ortomosaiikkikuvien muodostuksessa koettiin aluksi suuria ongelmia, sillä sään ollessa vähänkään pilvinen, ei Pix4D osannut enää muodostaa kuvaa oikein. Häiriö ilmeni ortomosaiikkikuvissa datan puuttumisena joistakin kohdista tai hyvin epätarkasta kuvasta, joka oli hyödytön analysointia ajatellen. Ongelmaa saatiin korjattua ottamalla GCP-pisteistä tarkemmat RTK-tarkkuudella olevat koordinaattipisteet, jolloin jokaisesta mittauspisteestä saatiin otettua lopulta tarvittavat lämpötilamittaukset ilmakuvista. Joissakin ortomosaiikkikuvissa on silti havaittavissa pieniä virheitä tai puuttuvia datapisteitä (kuva 27).

6.2 Lämpökameran kalibrointi

Tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella kuvien kalibrointia varten käytetty vesiastia todettiin riittäväksi, koska kameralla saatiin otettua siitä onnistuneet kuvat jokaisella kerralla. Ero todelliseen ei ollut myöskään merkittävä, sillä kamera sai veden lämpötilaksi lähes saman tuloksen, kuin mitä Ahlbornin anturi (taulukko 3). Verrattuna käsikäyttöiseen lämpökameraan eroa oli enemmän, joten tämän perusteella voidaan todeta, että lämpökameroissa on eroja myös saman valmistajan laitteissa (taulukko 3). Käsikäyttöisen lämpökameran tapauksessa eroa aiheutti myös kuvan tarkan lämpötilapisteen löytäminen samaan tapaan, kuten maasta mitattujen pisteiden tapauksessa. Koska lämpötilaero

dronen lämpökameran ja Ahlbornin anturin välillä oli lähes olematon, voidaan todeta dronen lämpökameran näyttävän oikeita lämpötiloja paikallaan ollessaan. Ilmasta saatujen kuvien välillä taas oli eroja, jotka ilman vääristävä vaikutus ja auringon säteilyn heijastuskulman muutokset saivat mahdollisesti aikaan.

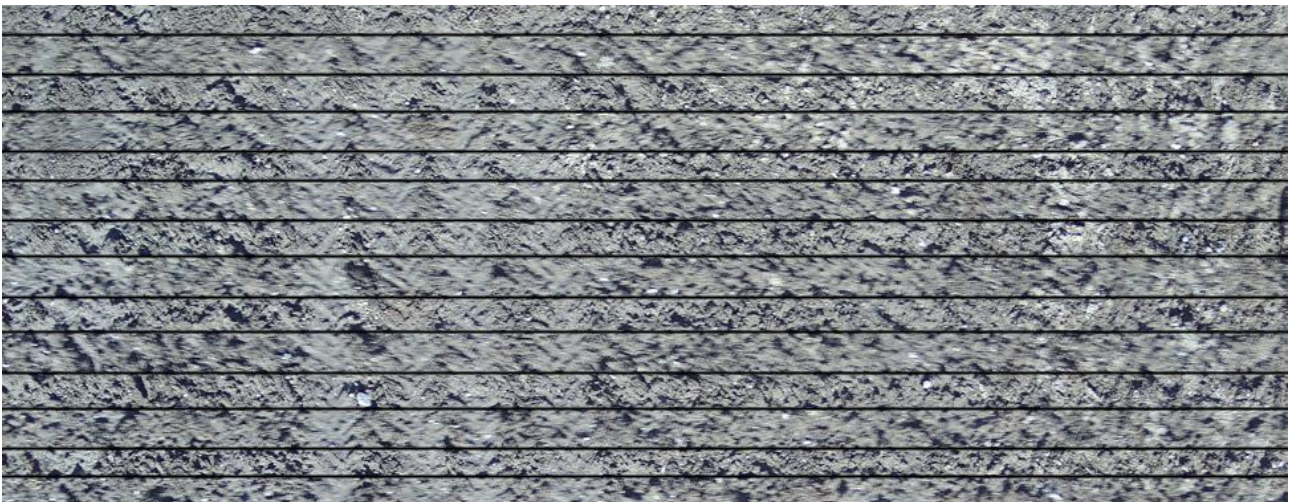
Kelly ym. (2019) tutkimuksessa kalibroitiin saman tuoteperheen kameraa (Flir Vue Pro 640) ensin laboratorio-olosuhteissa blackbodin avulla. Laboratoriokokeen tuloksena he laskivat, että kameran olisi syytä olla päällä noin tunti ennen kuvauksen alkua, jotta kameran sisällä oleva valokenno ehtii lämmetä sille ominaiseen käyttölämpötilaan, eikä merkittävää kuvan lämpösiirtymää tarvitsisi taten ottaa huomioon. Ero lämpimän ja kylmän kameran välillä oli vain joitain asteen kymmenyksiä, joten peltokuvausten tapauksessa erolla ei välttämättä ole suurta merkitystä, koska kuvien tarkkuus vaihtelee dronen heilumisen ja tuulen mukaan. Pelto olosuhteissa he kalibroivat kameran puolestaan eri heijastusasteen omaavien levyjen avulla samaan tapaan, kuin Guo ym. (2019) tutkimuksessaan. Guo ym. (2019) tutkimuksessa kameran kalibroitipisteiden määrän lisääminen paransi kalibroititulosta. Tekemässäni tutkimuksessa oli dronen lämpökameraan käytössä vain yksi kalibroitipiste, mutta lämpötilaeron ollessa hyvin pieni, ei pisteiden lisäämisellä olisi ollut tässä tutkimuksessa merkittävää vaikutusta. Tässä tutkimuksessa kalibrointi ei ollut suuressa roolissa, koska pellon pinta antoi hyvin vaihtelevia tuloksia pieneltäkin alueelta, jotka Pix4D tasoitti ortomosaiikkikuvia muodostettaessa.

Jensen ym. (2012) ja Jensen ym. (2013) keskittyivät tutkimuksissaan pienen dronen, AggieAirin lämpökameran tarkkuuteen ja kalibrointiin. Heillä tutkittavana kohteena oli virtaavan joen lämpötila. Tutkimuksen tuloksena heidän lämpökameransa tarkkuus ei ollut läheskään niin hyvä, kuin Guo ym. (2019) tutkimuksessa. Tätä selitettiin ilman epäpuhtauksien ja ilmapirran aiheuttamalla virheellä lämpökameran linssissä. Kalibroinnin apuna heillä oli maassa kiinteästi oleva lämpökamera ja lämpötilasäädely vesihaude. Heillä lentokorkeuden ääriarajat olivat kaksisataa metriä ja tuhat metriä. Omassa tutkimuksessani lentokorkeus oli viisikymmentä metriä, joten resoluutio oli huomattavasti tarkempi eikä ilman vääristävällä vaikutuksella ollut suurta merkitystä. Heidän tutkimuksissaan resoluutiot olivat 60x60 senttimetriä ja 280x280 senttimetriä edellä mainittujen korkeuksien mukaan.

Tässä tutkimuksessa resoluutio oli kaikissa kuvauksissa puolestaan 2,6x2,6 senttimetriä, mikä on huomattavasti käytännöllisempi ajatellen muun muassa täsmäviljelyä. Tarkkuuden menetys Jensen ym. (2012) ja Jensen ym. (2013) tutkimuksissa johtuu hyvin korkeasta lentokorkeudesta, joka on

suoraan verrannollinen tarkkuuteen. Myös jatkuvasti muuttuva ja liikkuva veden pinta saattoi osaltaan vaikuttaa tulokseen. Tässä tutkimuksessa pellon pinnan ollessa liikkumaton, jäi häiriön aiheuttajaksi suurimmaksi osaksi tuulen vaikutus dronen liikkumiseen sekä mahdolliset häiriöheijasteet.

Joissakin tekemässäni tutkimuksessa käytössä olleella kameralla otetuissa RGB-kuvissa esiintyi satunnaista jello effect:ä, joka aiheutti kuviin säännöllistä tai epäsäännöllistä sumeutta (kuva 29). Virheen aiheuttajaksi epäiltiin dronen aiheuttamaa tärinää, joka oli pyritty minimoimaan erilaisilla joustavilla kumikappaleilla dronen ja lämpökameran kiinnitysrungon välissä. Lämpökuvissa vastaavaa häiriötä ei pystytty todentamaan, koska kuvien resoluutio on huonompi, kuin RGB-kuvien resoluutio. Häiriön poistamiseksi ainoa tehokas keino olisi ollut kirjallisuuden mukaan koko kameran vaihtaminen. Flir Duo Pro R -kamera käyttää sulkijatekniikkanaan niin kutsuttua rolling shutteria, eli kuvan valotusvaiheessa kamera luo kuvan pikselirivi kerrallaan. Liika tärinä tai muu liike valotusprosessin aikana aiheuttaa joillakin pikseliriveillä niiden päällekkäisyyttä, jolloin kuvasta tulee vuorottelevasti sumea ja tarkka. Toisena käytössä olevana sulkijatekniikkana on global shutter, jolloin kyseistä ongelmaa ei esiinny johtuen koko kuvan valottumisesta kerralla (Cromie 2021). Lämpökameran virtuaalisella karttatasolla havaittiin myös kuvauksen kannalta merkityksetön virhe, sillä kaikki lämpökameran ottamat kuvat olivat 90 astetta kääntyneenä virtuaalisella karttatasolla. Vian syytä yritettiin selvittää monilla eri keinoilla, mutta se ei korjaantunut. Kuvankäsittelyohjelma osasi onneksi korjata kuvien suunnan suoraan alaspäin.



Kuva 29. Jello effect -häiriö. Häiriö erotettu mustilla suorakaiteilla muusta kuvasta.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen päätavoitteena oli selvittää, kuinka hyvin droneen kiinnitetyllä lämpökameralla voidaan ottaa kasvustokuvia ja mitä niistä voidaan selvittää. Tutkimusta lämpökameran käyttämisestä kasvustokuvauksiin on tehty jo jonkin verran, mutta tutkimusta pelkän dronen lämpökameran ja maan todellisen lämpötilan mittaamisen välillä tarvittaisiin lisää. Lämpökameran potentiaali kasvustokuvauksissa on korkea, koska sillä voidaan käydä läpi suuri alue lyhyessä ajassa. Tällöin voidaan tutkia kasvustoa myös silloin, kun maa on liian kostea kävellen tai koneella liikkumiseen. Kuvauskonseptin käyttökelpoisuus oli yleisellä tasolla kohtuullisen käyttökelpoinen. Muutama kuvanmuodostus epäonnistui, mutta siihen voi olla useita eri syitä. Tästä yhtenä esimerkkinä yksittäisen kuvan datan korruptoituminen tuntemattomasta syystä ortomosaiikkikuvan muodostusvaiheessa.

Tässä tutkimuksessa droneen kiinnitettävän lämpökameran käyttäminen lämpötilan mittauksessa todettiin riittävän tarkaksi silloin, kun maasta on saatavilla vertailudataa erilaisilla maasta fyysisesti dataa mittaavilla antureilla. Tulokset kuitenkin osoittivat myös sen, että mittaussyvyydellä on suuri vaikutus, sillä jo senttimetrin syvyydellä lämpötilaero pinnan ja pinnan alapuolen välillä on suuri. Tässä tutkimuksessa käsikäyttöisen lämpökameran käyttäminen ei tuottanut kovinkaan tarkkoja tuloksia, eikä sitä voida suositella käytettäväksi toisena vertailupisteen laskijana. Kosteuden määrittäminen ilmasta ei tuottanut riittävän tarkkoja tuloksia tutkimuksessa käytetyllä lämpökameralla, joten sen käyttäminen kosteuden mittaamiseen ei ole luotettavaa ilman lisätutkimusta.

Tulevissa kuvauksissa tulisi tulosten parantamisen kannalta ottaa huomioon paikannuksen onnistuminen, jotta vertailupisteet tulisivat varmasti samasta pisteestä. Tässä tutkimuksessa virhettä aiheuttivat myös osittain huonot kuvausolosuhteet yksittäisinä päivinä ja puutteelliset kuvausasetelmat, joten myös niihin olisi hyvä kiinnittää enemmän huomiota. Vaikka tässä tutkimuksessa tulokset eivät olleet suurimmalta osin kovinkaan lupaavia, ei se tarkoita, että kaikki lämpökamerat olisivat yhtä heikkolaatuisia. Ongelmat saattoivat johtua myös käytetystä ohjelmasta, koska se kuvien yhdistämisprosessissa laski keskiarvoja, jotka muuttuivat hieman jokaisella ajokerralla, vaikka kyseessä oli sama aineisto. Myös ihmisellä oli vaikutusta tulosten tarkkuuteen, koska mittausta ei ollut standardisoitu niin, että se olisi tapahtunut samalla tavalla jokaisella kerralla.

Kyseisellä lämpökameralla tulevissa koeasetelmissa tulisi käyttää tarkempia mittauspisteitä tai maahan kiinteästi sijoitettuja lämpötila-antureita, jotta lämpötilat voitaisiin aina saada täsmälleen samasta

kohdasta ja täysin samalla hetkellä dronen lämpökameran kanssa. Mittaukset olisi syytä toteuttaa myös täysin aurinkoisena tai pilvisenä päivänä, eikä puolipilvisenä päivänä. Myös tuulen voimakkuuteen olisi syytä kiinnittää enemmän huomiota, koska pienikin puuska vaikuttaa droneen ja kuvat saattavat heilahtaa, jolloin kuvankäsittelyohjelma ei osaa yhdistää kuvia oikein. Jos kuvaukset onnistuvat, voitaisiin onnistuneita kuvia hyödyntää muun muassa satotason arviointiin sekä kasvustollisten ongelmien havaitsemiseen, koska dronella kasvuston joukkoon ei tarvitse itse mennä ja täten myös aikaa säästyy.

8 KIITOKSET

Haluan kiittää apulaisprofessori Antti Lajusta työn ohjaamisesta ja mittauksissa avustamisesta sekä tohtoriopiskelija Mikael Änäkkälää dronella tehtyjen kuvausten suorittamisesta.

9 LÄHTEET

- Ahirwar, S., Swarnkar, R., Bhukya, S. & Namwade, G. 2019. Application of drone in agriculture. *International journal of current microbiology and applied science*. 8: 2500–2500.
- Ardupilot 2021. <https://ardupilot.org/planner/> Viitattu 15.3.2022
- Aragon, B., Johansen, K., Parkens, K., Malbeteau, Y., Al-Mashharawi, S., Al-Amoudi, T., Andrade, F. A., Turner, D., Lucieer, A. & McCabe, M. F. 2020. A calibration procedure for field and uav-based uncooled thermal infrared instruments. *Sensors* 20: 1–24.
- Autio, T., Enroth, A., Hellstedt, M., Huhtamäki, T., Järvenpää, M., Kaila, E., Kari, M., Karttunen, J., Kivinen, T., Knaapi, J., Koistinen, M., Korhonen, P., Leinonen, A-R., Leppikorpi, K., Manninen, E., Mononen, J., Palva, R., Pastell, M., Pitenius, T., Peltonen, S., Ruokolainen, A., Saarinen, P., Sairanen, A., Savela, P., Suokannas, A., Suomi, P. & Suurinkeroinen, S. 2014. *Teknologian hyödyntäminen maatilalla*. Porvoo, Bookwell Oy. 116 s.
- Bellvert, J., Zarco-Tetjada, P. J., Girona, J. & Fereres, E. 2014. Mapping crop water stress index in a ‘Pinot-noir’ vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precision agric* 15: 361–376.
- Beltrami, H. & Kellman, L. 2003. An examination of short- and long-term air-ground temperature coupling. *Global and Planetary Change* 38: 291–303.
- Bendig, J., Bolten, A. & Bareth, G. 2012. Introducing a low-cost mini-uav for thermal- and multi-spectral-imaging. *International archives of the photogrammetry remote sensing and spatial information sciences*, volume XXXIX-B1
- Berni, J. A. J., Zarco-Tejada, P. J., Suárez, L. & Fereres, E. 2009. Thermal and narrowband multi-spectral remote sensing for vegetation monitorin from an unmanned aerial vehicle. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*.
- Brzozowski, B., Daponte, P., De Vito, L., Lamonaca, F., Picariello, F., Pompetti, M., Tudosa, I. & Wojtowicz, K. 2018. A remote-controlled platform for uas testing. *IEEE A&E systems magazine*. s. 48–56.
- Cai, G., Lum, K-Y., Chen, B. M. & Lee, T. H. 2010. A brief overview on miniature fixed-wing unmanned aerial vehicles. *IEEE international conference on control and automation Xiamen, China, June 9–11, 2010* 285–290.
- Colturato, A. B., Gomes, A. B. Pigatto, D. F., Colturato, D. B., Pinto, A. S. R., Branco, L. H. C., Furtado, E. L. & Branco, K. R. L. J. C. 2013. Pattern recognition in thermal images of plants pine using artificial neural networks. *Teoksessa: Iliadis, L., Papadopoulos, H. & Jayne, C. (toim.) EANN 2013, Part I, Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, CCIS 383, s. 406–413.*
- Cromier, G. 2021. Understanding & fixing rolling shutter effect. *Shotkit magazine*. <https://shotkit.com/rolling-shutter/> Viitattu 25.4.2022.
- Crusiol, L. G. T., Nanni, M. R., Furlanetto, R. H., Sibaldelli, R. N. R., Cezar, E., Mertz-Henning, L. M., Nepomuceno, A. L., Neumaier, N. & Farrias, J. R. B. 2020. UAV-based thermal imaging in the assessment of water status of soybean plants. *International journal of remote sensing*. 9: 3243–3265.
- Esposito, M., Crimaldi, M., Cirillo, V., Sarghini, F. & Maggio, A. 2021. Drone and sensor technology for sustainable weed management: a review. *Chemical and biological technologies in agriculture* 18:1–11.

- EU 2019. KOMISSION TÄYTÄNTÖÖNPANOASETUS (EU) 2019/947, annettu 24 päivänä toukokuuta 2019, säännöistä ja menetelmistä miehittämättömien ilma-alusten käytössä (ETA:n kannalta merkityksellinen teksti) Sähköinen painos: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0947&from=EN%C2%A0> Viitattu 4.2.2022
- Flir 2017. Flir Duo Pro R user guide. <https://www.flir.com/support/products/duo-pro-r/#Documents> Viitattu 9.2.2022.
- Gallo, M. A., Willits, D. S., Lubke, R. A. & Thiede, E. C. (1993, ref. Mesas-Carrascosa 2018). Low-cost uncooled ir sensor for battlefield surveillance. *Proceed. SPIE* 351–362
- Gerald, C. H. 2000. Common sense approach to thermal imaging. Florida, USA 392 s.
- Gómes-Cabdón, D., Virlet, N., Labbé, S., Jolivot, A. & Regnard, J-L. 2016. Field phenotyping of water stress at tree scale by uav-sensed imagery: new insights for thermal acquisition and calibration. *Precision agriculture*. 17: s. 786–800.
- Guo, Y., Senthilnath, J., Wu, W., Zhang, X., Zeng, Z, & Huang, H. 2019. Radiometric calibration for multispectral camera of different imaging conditions mounted on a UAV platform. *Sustainability*. 11:978
- ICNIRP 2022 International commission on non-ionizing radiation protection. <https://www.icnirp.org/en/frequencies/infrared/index.html> Viitattu 4.2.2022
- Heege, H. J. 2013. Sensing on natural soil properties. Teoksessa: Heege, H. J. (toim.) *Precision in crop farming*. New York: Dordrecht: Springer 361 s.
- Hellebrand, H. J., Linke, M., Beuche, H., Herold, B. & Geyer, M. 2000. Horticultural products evaluated by thermography. Institute of agricultural engineering bornim, Potsdam, Germany. <http://www2.atb-potsdam.de/Hauptseite-deutsch/Institut/Abteilungen/abt2/Mitarbeiter/jhellebrand/jhellebrand/Publikat/AgEng2000PH3.pdf>
- Ishimwe, R., Abutaleb, K. & Ahmed, F. 2014. Applications of thermal imaging in agriculture- A review. *Advances in remote sensing*. 3: s. 128–140.
- Jaakkola, A., Hyypä, J., Kukko, A., Yu, X., Kaartinen, H., Lehtomäki, M. & Lin, Y. 2010. A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*. 65: 514-522.
- Jensen, A. M., Neilson, B. T., McKee, M. & Chen, Y.Q. 2012. Thermal remote sensing with an autonomous unmanned aerial remote sensing platform for surface stream temperatures. *IEEE International geoscience and remote sensing symposium*. 5049–5052
- Jensen, A. M., McKee, M. & Chen, Y. Q. 2013. Calibrating thermal imagery from an unmanned aerial system – Aggieair. *IEEE International geoscience and remote sensing symposium*. 542–545.
- Kelly, J., Kljun, N., Olsson, P-O., Mihail, L., Liljeblad, B., Weslien, P., Klemedtsson, L. & Eklundh, L. 2019. Challenges and best practices for deriving temperature data from an uncalibrated uav thermal infrared camera. *Remote sensing*. 567: 1-21.
- Khanal, S., Fulton, J. & Shearer, S. 2017. An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. *Computers and electronics in agriculture*. 139: 22–32.
- Khorsandi, A., Hemmat, A., Mireei, S. A., Amirfattahi, R. & Ehsanzadeh, P. 2018. Plant temperature-based indices using infrared thermography for detecting water status in sesame under greenhouse conditions. *Agricultural water management*. 204: 222–233.

- Kullberg, E. G., DeJonge, K. C. & Chávez, J. L. 2017. Evaluation of thermal remote sensing indices to estimate crop evapotranspiration coefficients. *Agricultural water management*. 179: 64–73.
- Laitinen, P. 2020. Blogi: Ruiskudrone kasvinsuojelun tulevaisuuden valokeilassa? <https://tukes.fi/-/ruiskudrone-kasvinsuojelun-tulevaisuuden-valokeilassa-> Viitattu 8.2.2022.
- Lawson, R. 1956. Implications of surface temperatures in the diagnosis of breast cancer. *Canadian Medical Association journal* 75:309–310.
- Lund, E. 2019. Comparing organic matter estimations using two farm implement mounted proximal sensing technologies. 35–40 s. Julkaisussa: Sudduth, K. A., Kitchen, N. R. & Veum, K. S. (toim.). 5th global workshop on proximal soil sensing. 286 s.
- Maddikunta, P. K. R., Hakak, S., Alazab, M., Bhattacharya, S., Gadekallu, T. R., Khan, W. Z. & Pham, Q-V. 2020. Unmanned aerial vehicles in smart agriculture: applications, requirements and challenges. *IEEE sensors journal*
- Meivel, S. M. E., Maguteeswaran, R., Gandhiraj, B. E. & Srinivasan, G. 2016. Quadcopter uav based fertilizer and pesticide spraying system. *Journal of engineering sciences*. 1: 8–12.
- Meola, C. & Carlomagno, G. M. 2004. Recent advances in the use of infrared thermography. *Measurement science and technology* 15: 27–58.
- Merwe, D., Burchfield, D. R., Witt, T. D., Price, K. P. & Sharda, A. 2020. Drones in agriculture. *Advances in agronomy*, 162: 1–30.
- Mesas-Carrascosa, F-J., Pérez-Porras, F., Larriva, J. E. M., Frau, C. M., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Martínez-Carricondo, P. & Garcia-Ferrer, A. 2018. Drift correction of light-weight microbolometer thermal sensors onboard unmanned aerial vehicles. *Remote sensing* 4:615
- Messina, G. & Modica, G. 2020. Applications of uav thermal imagery in precision agriculture: State of the art and future research outlook. *Remote sensing* 12:1–26.
- Micasense. 2015. Micasense rededge 3 multispectral camera user manual. <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/215261448-RedEdge-User-Manual-PDF-Download-> Viitattu 4.2.2022
- MicaSense 2021. <https://micasense.com/altum-pt/> Viitattu 4.2.2022.
- Młynarczyk, A. & Królewicz, S. 2021. Radiometric calibration of the yuneecc e10t thermal camera. https://www.researchgate.net/profile/Slawomir-Krolewicz/publication/353973349_Radiometric_calibration_of_the_Yuneecc_e10t_thermal_camera/links/611cf17a0c2bfa282a514ca6/Radiometric-calibration-of-the-Yuneecc-e10t-thermal-camera.pdf Viitattu 4.2.2022
- Mouazen, A. M., De Baerdemaeker, J. & Ramon, H. 2006. Effect of wavelength range on the measurement accuracy of some selected soil constituents using visual-near infrared spectroscopy. *Near infrared spectrosc* 14: 189–199.
- Niu, H., Zhao, T., Wang, D. & Chen, YQ. 2019. A uav resolution and waveband aware path planning for onion irrigation treatments inference. *International conference on unmanned aircraft systems Atlanta, GA, USA, June 11-14*. s. 808–812.
- Pix4D 2021. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115002471546-Image-acquisition> Viitattu 17.2.2022
- Rogalski, A. 2012. History of infrared detectors. *Opto-electronics review*. 20: 279–308.

- Ribeiro-Gomes, K., Hernández-Lopez, D., Ortega, J. F., Ballesteros, R., Poblete, T. & Moreno, A. 2017. Uncooled thermal camera calibration and optimization of the photogrammetry process for UAV applications in agriculture. *Sensors* 17:2173.
- Sagan, V., Maimaitijiang, M., Sidike, P., Eblimit, K., Peterson, K. T., Hartling, S., Esposito, F., Khanal, K., Newcomb, M., Pauli, D., Ward, R., Fritschi, F., Shakoor, N. & Mockler, T. 2019. Uav-based high resolution thermal imaging for vegetation monitoring, and plant phenotyping using ICI 8640 P, Flir Vue Pro R 640, and thermoMap cameras. *Remote sensing* 330: s. 1–29.
- Saha, A. K., Saha, J., Ray, R., Sicar, S., Dutta, S., Priyo, S., Chattopadhyay, S. P. & Saha H. N. 2018. IOT-based drone for improvement of crop quality in agricultural field. *IEEE 8th annual computing and communication workshop and conference*. s. 612-615
- Santangeli, A., Chen, Y., Klun, E., Chirumamilla, R., Tiainen, J. & Loehr, J. 2020. Integrating drone-borne thermal imaging with artificial intelligence to locate bird nests on agricultural land. *Scientific reports* 10: 10993
- Santesteban, L. G., Di Gennaro, S. F., Herrero-Langreo, A., Miranda, C., Royo, J. B. & Matese, A. 2017. High-resolution UAV-based thermal imaging to estimate the instantaneous and seasonal variability of plant water status within a vineyard. *Agricultural water management*. 183: 49–59.
- Sener, M., Pehlivan, M., Tekiner, M., Ozen, U. E., Erdem, T., Celen, H. H., Seren, A., Aytac, S. A., Kolsuz, H. U., Seyrek, K., Guresci, G., Kose, G. & Turan, L. 2019. Monitoring of irrigation schemes by using thermal camera mounted uav's. *Fresenius environmental bulletin* 28: 4684–4691.
- SenseFly Ltd. 2017. User manual thermomap camera. Viitattu 15.2.2022
- SenseFly 2022 <https://www.sensefly.com/> Viitattu 7.2.2022
- Siljander, T. 2021. Usability of tractor's draft data in precision agriculture. https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/331576/Tomi_Siljander_Maisterintutkielma_2021.pdf?sequence=2&isAllowed=y Viitattu 20.4.2022
- Stander, R., Walker, D. J., Rohwer, F. C. & Baydack, R. K. 2021. Drone nest searching applications using a thermal camera. *Wildlife society bulleting*. 3: 371–382.
- Szafron, C. 2014. Application of thermal imaging in electrical equipment examination. Wroclaw university of technology. <https://core.ac.uk/download/pdf/59264908.pdf> Viitattu 9.2.2022.
- Teledyne 2019. <https://www.flir.eu/discover/professional-tools/how-do-you-calibrate-a-thermal-imaging-camera/> Viitattu 3.2.2022
- Teledyne 2020. <https://www.flir.com/discover/rd-science/how-do-thermal-cameras-work/> Viitattu 4.2.2022
- Teledyne 2021. <https://www.flir.com/browse/home-amp-outdoor/drone-cameras/> Viitattu 4.2.2022.
- Tetrault, C. 2015. A short history of unmanned aerial vehicles (UAVs). <https://web.archive.org/web/20150923220258/http://www.draganfly.com/news/2009/03/04/a-short-history-of-unmanned-aerial-vehicles-uavs/>
- Traficom 2022. DroneInfo. <https://droneinfo.fi/fi/koulutusmateriaali/mita-saantoja-ilmassa-ilmailun-saadokset?toggle=Uudet%20m%C3%A4%C3%A4r%C3%A4ykset%20lyhyesti&toggle=Miten%20alakategoriaat%20A1%20%E2%80%93%20A2%20%E2%80%93%20A3%20on%20m%C3%A4%C3%A4ritelty%3F> Viitattu 9.2.2022

- Tucci, G., Parisi, E. I., Castelli, G., Errico, A., Corongiu, M., Sona, G., Vviani, E., Bresci, E. & Preti, F. 2019. Multi-sensor UAV application for thermal analysis on a dry-stone terraced vineyard in rural Tuscany landscape. *International journal of geo-information* 8:87–108.
- Urrestarazu, M. 2013. Infrared thermography used to diagnose the effects of salinity in a soilless culture. *Quantitative infrared thermography*. 10: s. 1–8.
- Vanitha, N. 2021. A study on the applications of drones in smart farming. *Julkaisussa Implication of Iot in public projects* 1: 44-52.
- Vergouw, B., Nagel, H., Bondt, G. & Custer, B. 2016. Drone technology: Types, payloads, applications, frequency spectrum issues and future developments. Teoksessa: Custer, B. (toim.) *The future of drone use - Opportunities and threats from ethical and legal perspectives*. Netherlands: Asser press. 394 s.
- Weidong, L., Baret, F., Xingfa, G., Qingxi, T., Lanfen, Z. & Bing, Z. 2002. Relating soil surface moisture to reflectance. *Remote sensing of environment*. 81: 238–246.
- Zhao, T., Niu, H., Anderson, A., Chen, Y. Q. & Viers, J. 2018. A detailed study on accuracy of uncooled thermal cameras by exploring the data collection workflow. Teoksessa: Thomasson, J. A., McKee, M. & Moorhead, R. J. (toim.) *Autonomous air and ground sensing systems for agricultural optimization and phenotyping III (SPIE commercial + Scientific sensing and imaging, 2018, Orlando, Florida, United States)*.
- Zhang, C. & Kovacs, J. M. 2012. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision agriculture* 6: 693–712.