

KLAIPĖDOS UNIVERSITETO  
JŪROS TYRIMŲ INSTITUTAS

**UŽLIEJAMŲ TERITORIJŲ KARTOGRAFAVIMAS  
NEMUNO DELTOJE NAUDOJANT NUOTOLINIUS  
TYRIMŲ METODUS**

Ekologijos ir aplinkotyros studijų programos magistro baigiamasis darbas

Autorius	JMNEA19 Jonas Gintauskas
Vadovė	dr. Diana Vaičiūtė
Konsultantas	dr. Martynas Bučas

Reg. nr. ....

Klaipėda, 2021

# SANTRAUKA

**Jonas Gintauskas**

## **UŽLIEJAMŲ TERITORIJŲ KARTOGRAFAVIMAS NEMUNO DELTOJE NAUDOJANT NUOTOLINIUS TYRIMŲ METODUS**

Ekologijos ir aplinkotyros studijų programos magistro baigiamasis darbas

Darbo vadovė: dr. Diana Vaičiūtė

Konsultantas: dr. Martynas Bučas

Klaipėdos universitetas

Jūrinių tyrimų institutas

Klaipėda, 2021

Darbo apimtis: 64 p., 4 lent., 24 pav.

Pagrindiniai žodžiai: sintetinės apertūros radaras, dronas, Atsitiktinio miško klasifikatorius, užliejamos teritorijos, Nemuno delta

Šio darbo tikslas buvo įvertinti palydovinių Sentinel-1 sintetinės apertūros radarų (SAR) duomenų panaudojimo galimybes užliejamų teritorijų kartografavimui Lietuvoje. Atliekant šį tyrimą 2019-2021 metų laikotarpiu buvo atlikti 4 drono skrydžiai (prie Kintų gyvenvietės ir prie Sakūčių miško) bei sudarytos skrydžių metu padarytų nuotraukų mozaikos, iš kurių 3 buvo panaudotos šiame tyrime (dėl sniego dangos viena mozaika darbe nebuvo panaudota) klasifikatoriaus mokymui bei palydovinių SAR duomenų validacijai. Surinkta 660 Sentinel-1 SAR vaizdų iš kurių sudaryti 173 vaizdų junginiai 2015-2019 metų laikotarpiu užliejamų teritorijų kartografavimui Nemuno deltoje (Lietuvoje ir Rusijoje). Palyginus 2 tiriamus metodus šiame darbe: atsitiktinio miško klasifikatoriaus ir skirtumų tarp dviejų laikotarpių, validavimo rezultatai parodė, kad tikslesnis buvo atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodas. „Karštųjų taškų“ analizei buvo panaudoti 173 SAR vaizdai, kiekvieniems metams ir visam tiriamam laikotarpiui siekiant nustatyti dažniausiai užliejamas teritorijas. Dažniausiai užlietos teritorijos buvo Lietuvos teritorijoje, dešiniajame Nemuno krante. Buvo įvertinti užliejamų teritorijų ir nuosėdų, žemėnaudos bei topografijos erdviniai dėsningumai. Rezultatai parodė, kad ilgiausiai užlietos teritorijos buvo 2017 m. iš tiriamojo 2015-2019 m. laikotarpio. Užliejimų vanduo ilgiausiai išsilaikė vietovėse su įvairaus moreninio priemolio, priesmėlio nuosėdomis ir pelkėtose vietovėse (buvo tiriama tik Lietuvos teritorijoje). Iš palydovų gautus duomenis palyginus su potencialiomis užliejimų vietomis, kurios buvo gautos pritaikius topografinį drėgmės indeksą, buvo gautas 7 % atitikimas.

# SUMMARY

**Jonas Gintauskas**

## **MAPPING OF FLOODED AREAS IN THE NEMUNAS RIVER DELTA USING REMOTE SENSING METHODS**

Master's thesis of Ecology and Environmental Science studies

Supervisor: dr. Diana Vaičiūtė

Consultant: dr. Martynas Bučas

Klaipeda University

Marine Research Institute

Klaipeda, 2021

Work size: 64 pages, 4 tables, 24 pictures.

Key words: synthetic aperture radar, drone, Random Forest Classification, flooded areas, Nemunas River delta

Flooded areas in the Nemunas River delta are dynamic and ever-changing environments, depending on weather, hydrology, and other conditions, such as topography, soil, and land cover. Most common factors of flooded areas formation in the Nemunas River delta are human activities, such as the installation of embankments or polders. Areas that are flooded for a long time can affect vegetation communities and types. Flooded areas can cause significant changes in physical processes, such as water flow and water evaporation in a river basin. In extreme situations, emission of methane gas (CH<sub>4</sub>) can occur from flooded areas, which are more potent greenhouse gas than CO<sub>2</sub>. Due to these environmental traits, it is important to determine hotspots of flooded areas to assess the problem and find the solution for improvement of ecology in these type of areas, such as the installation of embankments and polders.

In this study 3 drone flights were completed in two areas in the Nemunas River delta (near Kintai village and Sakūčiai forest) during the period between 2019-2021. Images taken from drones were mosaicked using photogrammetry and used for the validation of flooded areas retrieval results from Synthetic Aperture Radar (SAR) images and supervised classification training. Flooded areas in the Nemunas River delta in Lithuania and Russia were investigated using SAR Sentinel-1 during the period 2015-2019. SAR image preparation and classification was done using Google Earth Engine, which is a powerful web platform for cloud-based processing of remote sensing data on large scale. For flooded areas, the mapping was done using two different methods: Random Forest Classification and change detection. With the Random Forest Classification method, it was possible to detect land, open water, and

temporally flooded vegetation, while with the change detection method only open water could be delineated from the land. Eventually, using change detection method, hotspots were compared with soil type, land cover, and topographical wetness index (TWI) data.

Validation of method classification showed that the Random Forest Classification method ( $92,9 \pm 2,2$  %) yielded a better result than the change detection method ( $84,7 \pm 11,2$  %). Even though the Random Forest Classification method yielded better results, it is considered to be a much complicated method to use in practice, as for training this method requires the collection of classification points during the field, while the change detection method approach only requires meteorological and hydrological information for selecting the right dry period for comparison.

Hotspots analysis showed that most often flooded areas were found on the right bank of the Nemunas River, which is part of the Lithuania. The most common flooded areas were spotted around the Sakūčiai forest, around the Žalgiriai forest, and around the Bundalai forest. The analysis of hotspots and TWI of most potential places of flooded areas showed only 7 % of correspondence. While the most important factors for flooding are high precipitation and river water level, this was not the case with flooded areas, as comparison between flooded areas and these factors have not showed correlation. Results showed that flooded areas can be affected by other factors, such as land cover, soil, and topography.

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. SAR poliarizacijos ir jų bangos ilgis bei dažnis, 8 psl.

2 lentelė. Atsitiktinio miško klasifikatoriaus (AMK) ir skirtumų metodo validavimas, naudojant drono skrydžio mozaikas iš 2 tyrimo teritorijų (Kintų žuvininkystės tvenkinių ir Sakūčių miško). Vidutinis tikslumas ( $\pm$  standartinis nuokrypis) kiekvieno metodo, 35 psl.

3 lentelė. Nuosėdų pasiskirstymas pagal 2015-2019 metų užlietų teritorijų dažnį 2015-2019 m. laikotarpiu. Skliausteliuose nurodyta kiekvieno nuosėdų sluoksnio užimama teritorija, tyrimo vietoje (%), 48 psl.

4 lentelė. Žemėnaudos pasiskirstymas pagal 2015-2019 metų užlietų teritorijų dažnį 2015-2019 m. laikotarpiu. Skliausteliuose nurodyta kiekvieno žemėnaudos sluoksnio užimama teritorija, tyrimo vietoje (%), 49 psl.

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

- 1 pav. Supaprastinta sintetinės apertūros radaro (SAR) geometrinė struktūra (Osmundsen et al, 2009), 8 psl.
- 2 pav. SAR signalą veikiančios reljefo formos (Lauknes, 2011), 9 psl.
- 3 pav. Tyrimo vieta: Nemuno delta (koordinacių sistema: LKS-94), 16 psl.
- 4 pav. SAR duomenų pirminio paruošimo metodika, 17 psl.
- 5 pav. Duomenų paruošimas, naudojant atsitiktinio miško klasifikatorių, 19 psl.
- 6 pav. Atsitiktinio miško klasifikatoriaus mokymui naudoti poligonai. Kintai, 2020-01-09, 20 psl.
- 7 pav. Duomenų paruošimas, naudojant skirtumų metodą, 22 psl.
- 8 pav. Drono duomenų paruošimo schema, 23 psl.
- 9 pav. Skirtingos dangos užliejimo laikotarpiu: A – atviras vanduo, B – nepilnai užlietos augalijos plotai, C – neužlieta teritorija. (Nuotrauka daryta: 2020-01-09), 23 psl.
- 10 pav. Kartografavimui dronu pasirinktos tyrimų vietos: 1) dirbamas laukas, šalia Kintų žuvininkystės ūkio, prie kelio Kintai – Šilutė, Povilų kaimas, Kintų seniūnija, Šilutės rajonas; 2) dirbamas laukas prie Sakūčių miško, šalia Klumbių siurblynės, Kintų seniūnija, Šilutės rajonas gautų duomenų kokybės užtikrinimui, naudojant droną (koordinacių sistema: LKS-94), 25 psl.
- 11 pav. Rezultatų analizės ir validavimo metodika, 26 psl.
- 12 pav. Nuosėdos tyrimo teritorijoje, Lietuvoje, 29 psl.
- 13 pav. Žemėnaudos žemėlapis tyrimo teritorijoje, Lietuvoje, 30 psl.
- 14 pav. Topografinis užliejimo indeksas tyrimo teritorijoje su užliejimo tikimybe, 31 psl.
- 15 pav. Duomenų validavimas, naudojant 2020-01-09 drono ortomozaiką ir suklasifikuotus Sentinel-1 vaizdus, Kintuose (pavaizduota), skirtingais metodais (A) atsitiktinio miško klasifikavimo metodu ir (B) skirtumų tarp dviejų laikotarpių metodu, 34 psl.
- 16 pav. Vidutinis užlietų teritorijų plotas 2015-2019 m. laikotarpiu (procentinė dalis nuo bendro tiriamos teritorijos ploto (2014,1 km<sup>2</sup>) panaudojant atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodą. Tamsi mėlyna – pilnai užlieta teritorija, šviesiai mėlyna – nepilnai užlietos augalijos plotai, 36 psl.
- 17 pav. Vidutinis metinis užliejamų teritorijų plotas (procentinė dalis nuo bendro tiriamosios teritorijos ploto, (2014,1 km<sup>2</sup>)) 2015-2019 metų laikotarpiu a) pilnai užlietos teritorijos, b) nepilnai užlietos augalijos plotai, panaudojant atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodą (Užliejamos teritorijos ploto ašys apima skirtingas maksimumo ribas), 39 psl.

18 pav. Vidutinis užlietų teritorijų plotas 2015-2019 m. laikotarpiu (procentinė dalis nuo bendro tiriamos teritorijos ploto (2014,1 km<sup>2</sup>), naudojant skirtumų metodą, 41 psl.

19 pav. Vidutinis metinis užliejamų teritorijų plotas (procentinė dalis nuo bendro tiriamosios teritorijos ploto (2014,1 km<sup>2</sup>) 2015-2019 metų laikotarpiu, panaudojant skirtumų metodą, 43 psl.

20 pav. Vidutinis užliejamų teritorijų plotas pagal skirtingus metodus (procentinė dalis nuo bendro tiriamosios teritorijos ploto, (2014,1 km<sup>2</sup>)) 2015-2019 metų laikotarpiu AMK (1) - pilnai užlietos teritorijos, panaudojant AMK metodą, AMK (2) – nepilnai užlietos augalijos plotai, panaudojant AMK metodą, Skirtumų – pilnai užlietos teritorijos, naudojant skirtumų metodą, 44 psl.

21 pav. 2015-2019 m. laikotarpiu Šyšos ties Šilute VMS debitų hidrografas ir Šilutės HMS kritulių kiekis (punktyrinė linija – kiekvienų metų debitų vidurkis Šyšos ties Šilute VMS, raudona spalva – potvynio ar poplūdžio laikotarpis), 45 psl.

22 pav. 2015-2019 m. laikotarpiu A) Šyšos ties Šilute VMS debitų; B) Šilutės HMS kritulių ir Nemuno deltos užliejimo dydžio (%) tiesinė regresija Nemuno deltoje, 46 psl.

23 pav. Užlietų teritorijų santykinis dažnumas 2015 - 2019 m. Nemuno deltoje, 47 psl.

24 pav. Užliejamų teritorijų pasiskirstymas pagal topografinio drėgmės indeksą ir pagal Sentinel-1 SAR 2015-2019 m. duomenis. Smėlio spalva – nesuklasifikuotos teritorijos, raudona – užliejamų teritorijų „karštieji taškai“, kur dažnis buvo didesnis nei 41%, mėlyna – kur potencialiai užliejamos teritorijos pagal topografinį drėgmės indeksą sutapo su užliejamų teritorijų „karštaisiais taškais“, 50 psl.

# TURINYS

<b>IVADAS</b> .....	<b>4</b>
<b>I. LITERATŪROS APŽVALGA</b> .....	<b>7</b>
1.1. Palydoviniai sintetinės apertūros radarai (SAR) ir jų duomenys.....	7
1.1.2. SAR duomenų validavimas.....	10
1.1.3 SAR panaudojimas užlietų teritorijų kartografavimui .....	10
1.2. Palydovinių SAR duomenų panaudojimas aplinkotyroje Lietuvoje ir pasaulyje .....	11
1.3. Užliejamų teritorijų susidarymas, jų ekologinė reikšmė.....	12
<b>II. METODAI</b> .....	<b>15</b>
2.1. Tyrimo vieta.....	15
2.2. SAR duomenų pirminis paruošimas .....	16
2.3. Užliejamų teritorijų kartografavimas panaudojant SAR duomenis .....	18
2.3.1. Atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodas.....	18
2.3.2. Skirtumų tarp sausojo ir užliejimo laikotarpių metodas.....	20
2.4. Drono duomenų paruošimas .....	23
2.5. Rezultatų analizės ir validavimo metodai .....	26
2.6. Užliejamų teritorijų „karštųjų taškų“ išskyrimas, nuosėdų ir žemėnaudos analizės metodai.....	27
2.6.1. „Karštųjų taškų“ analizė.....	27
2.6.2. Nuosėdų ir žemėnaudos užliejimo analizė .....	27
2.6.3 Topografinis drėgmės indeksas.....	30
2.7. Statistinė duomenų analizė .....	31
<b>III. REZULTATAI</b> .....	<b>33</b>
3.1. Metodų validavimas.....	33
3.2. Užlietų teritorijų pasiskirstymo dėsningumai Nemuno deltoje .....	35
3.2.1. Užlietų teritorijų erdvinis pasiskirstymas pagal skirtumų metodą.....	40

3.2.2. Užlietų teritorijų erdvinis pasiskirstymas pagal atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodą..	35
3.3. Užliejamų teritorijų „karštieji taškai“ .....	46
3.4. Užliejamų teritorijų, nuosėdų ir žemėnaudos tipo bei topografijos erdviniai dėsniumai .....	48
<b>IV. REZULTATŲ APTARIMAS.....</b>	<b>51</b>
<b>IŠVADOS .....</b>	<b>55</b>
<b>LITERATŪROS SĄRAŠAS.....</b>	<b>56</b>

## IVADAS

Užliejamos teritorijos yra dinamiška ir nuolat besikeičianti aplinka, kuri kinta kiekvienu metu laikotarpiu priklausomai nuo hidrometeorologinių sąlygų: upės debito, kritulių, vėjo. Dėl ilgai užlietų, drėgnų teritorijų pasikeičia augalų rūšių pasiskirstymas ir augimas (Kopecký et al., 2021). Taip pat užliejamos teritorijos, kur vanduo užsistovi ilgiausiai, yra svarbios ekologinei aplinkos būklei, nes tai yra palankios vietos šiltnamio efektą sukeliančių dujų – anglies dvideginio (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), susidarymui (Matthews et al., 2005; Gabriel et al., 2020).

Ekstremalios situacijos – potvyniai, taip pat gali suniokoti turtą bei aplinką. Potvynių stebėjimui, jų žalos suvaldymui ir kompensacijoms skiriama daug laiko ir lėšų, kurių suma 1980 - 2017 m. laikotarpiu Europos Sąjungoje siekė 166 milijardų eurų (Europos audito rūmai, 2018). Valstybė investuoja į potvynių suvaldymo planus bei tarnybas, kurios stebi potvynio raidą. Potvyniai padaro žalą draudimo bendrovėms, kurioms reikia kompensuoti žmonių patirtą žalą. Taip pat, Aplinkos Apsaugos Agentūra (AAA) vykdo potvynių monitoringą, kurio tikslas yra įgyvendinti Europos Sąjungos potvynių direktyvą (2007/60/EC), kuri siekia sudaryti potvynių rizikos valdymo planą. Nuotolinių tyrimų metodų pritaikymas gali tapti vienu iš monitoringą palengvinančių būdų.

Šio tyrimo vieta yra Nemuno delta, esanti vakarų Lietuvoje (Šilutės rajone) ir Rusijos Kaliningrado srityje (Polesko rajone), ties Nemuno įtekėjimu į Kuršių marias. Nemuno deltos teritorija pasižymi užliejamomis teritorijomis, didelius vandens lygio pokyčius deltoje sukelia ledo reiškiniai. Susidarius ledo grūstims, jas lydi vandens lygio paaukštėjimai (Žaromskis, 2013). Užliejamų teritorijų dydžio bei ploto matavimai ir stebėjimas yra svarbus ekologinei Nemuno deltos būklės stebėsenai, tačiau lauko tyrimų sąlygomis tai yra sudėtinga užduotis, kadangi stebėti reikėtų santykinai dideles teritorijas, kartais į jas įžengti labai sudėtinga ar net neįmanoma dėl aukšto vandens lygio. Tyrimus Nemuno deltos teritorijoje apsunkina ir geopolitinė padėtis, kadangi ši teritorija priklauso tiek Rusijai, tiek ir Lietuvai. Šiuo metu Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba prie Aplinkos ministerijos prognozuoja bei aprašo potvynio dydžius pagal vandens matavimo stočių vandens lygio bei debito duomenis. Tačiau, šiose stotyse, duomenys yra renkami tik tame taške, kuriame jos pastatytos ir negali reprezentuoti bendros užliejimų situacijos Nemuno deltoje.

Šiaurės Italijoje, šiaurės Ispanijoje, Graikijoje ir Rumunijoje užlietos teritorijos buvo stebimos panaudojant palydovinius optinių sensorių duomenis (Goffi et al., 2020; Pena-Regueiro et al., 2020), tačiau jie ne visada yra efektyvūs, pavyzdžiui, esant debesuotumui, kuris yra vienas iš šių duomenis limituojančių veiksnių. Palydovinių sintetinės apertūros radarų (SAR) duomenys suteikia galimybę

stebėti užlietas teritorijas nepriklausomai nuo meteorologinių sąlygų, nes SAR yra aktyvūs sensoriai (t.y., jiems nereikia išorinio energijos šaltinio, pavyzdžiui, Saulės šviesos), kurie patys generuoja ir priima signalą. SAR generuojamas signalas yra mikrobangų spektro diapazone, kuriems atmosfera ir joje vykstantys reiškiniai yra maksimaliai pralaidūs, todėl signalas geba prasiskverbti pro debesis, o matavimai gali būti atliekami tiek dienos, tiek nakties metu. SAR duomenys buvo plačiai naudojami aptikti užlietas teritorijas įvairiuose pasaulio regionuose, pavyzdžiui, Zambijoje (Tsyganskaya et al., 2018), Indonezijoje (Wakabayashi et al., 2019), Kanadoje (Brisco et al., 2019).

Prieš prasidedant Sentinel-1 misijai, užliejamų teritorijų kartografavimui buvo naudojami kiti SAR palydovai: ERS-1/ERS-2, ENVISAT, Radarsat-1, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed (Töyrä et al., 2002; Kussul et al., 2008; Dellepiane et al., 2012). 2014 metais EKA (Europos Kosmoso Agentūra) paleido pirmąjį (Sentinel-1A) SAR Sentinel-1 palydovą, 2016 metais EKA paleido antrą (Sentinel-1B) Sentinel-1 palydovą, kuris suteikė galimybę dažniau (iki 4 kartų per savaitę) stebėti Žemės paviršių. Sentinel-1 vis labiau populiarėja dėl to, kad tai yra pakankamai lengvai gaunami bei nemokami duomenys, todėl tai yra lengvai pasiekiamas ir mažai kaštų reikalaujantis būdas tirti užliejamas teritorijas. Lietuvos teritorijoje Copernicus suteikia momentinius ir tik pagal užsakymą padaromus rezultatus, kuriose išskirta tik pilnai užlietos teritorijos. Nors duomenų surinkimas tampa vis paprastesnis dėl tobulėjančių technologijų ir gausėjančių SAR palydovinių duomenų skaičiaus, tačiau detaliam, su nepilnai užlieta augalija, užlietų teritorijų kartografavimui Nemuno deltoje SAR duomenys kol kas nebuvo naudoti.

Tikslas:

Sukartografuoti užliejamas teritorijas panaudojant palydovinius Sentinel-1 sintetinės apertūros radarų (SAR) duomenis ir nustatyti jų erdvinio pasiskirstymo dėsninumus Nemuno deltoje 2015-2019 m.

Uždaviniai:

1. Įvertinti du (atsitiktinio miško klasifikatoriaus ir skirtumų tarp dviejų laikotarpių) palydovinių Sentinel-1 SAR duomenų apdorojimo metodus užliejamų teritorijų kartografavimui ir atlikti metodų validavimą su bepilote skraidykle gautais duomenimis.
2. Įvertinti metinę užliejamų teritorijų pasiskirstymo dinamiką Nemuno deltoje ir ryšį su upių debitu bei kritulių kiekiu.
3. Identifikuoti dažniausiai užliejamas teritorijas Nemuno deltoje.

4. Nustatyti sukartografuotų užliejamų teritorijų bei nuosėdų, žemėnaudos tipų ir topografijos pasiskirstymo dėsningumus.

Dėkoju savo darbo vadovei dr. Dianai Vaičiūtei ir darbo konsultantui dr. Martynui Bučui už pagalbą, idėjas, patarimus ir daug įdėto laiko šiame darbe bei padedant atrasti savo nišą moksle, taip pat už pagyrimus, kritiką ir motyvavimą viso magistrinio darbo metu. Dėkoju Edvinui Tiškui už pagalbą ir kompaniją surenkant duomenis dronu ir pasidalinant drono vaizdų apdorojimo metodika be kurios šis darbas neatrodytų toks koks yra dabar. Taip pat dėkingas CIEMAT už priėmimą ERASMUS+ praktikai ir ypač dr. Thomas Fritz Schmid Sutter už pasidalintą SAR duomenų apdorojimo metodika bei praktikos metu skirtą laiką. Dėkingas LHMT ir ypač Igor Osadčij už upės debitų, vandens lygių ir kritulių duomenų pasidalinimą bei patarimus dėl duomenų analizės. Už duomenų pasidalinimą ir informaciją, kuri buvo naudinga pirminiam duomenų paruošimui dėkingas dr. Jovitai Mėžinei, dr. Nataljai Čerkasovai ir dr. Robertui Staponkui.

# I. LITERATŪROS APŽVALGA

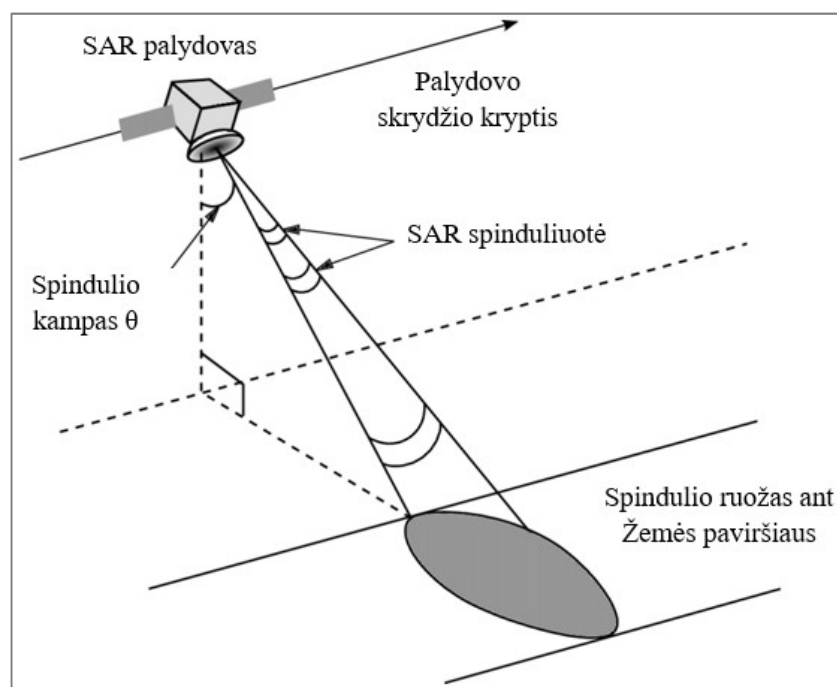
## 1.1. Palydoviniai sintetinės apertūros radarai (SAR) ir jų duomenys

Nuo pirmojo civilinio Seasat sintetinės apertūros radaro (SAR) paleidimo 1978 m. duomenų kiekis nuolat didėjo, atsirado daugiau moksliniams tikslams skirtų palydovinių radarų, tokių kaip SIR-A, SIR-B SIR-C/X-SAR, ERS-1/2, JERS-1, ENVISAT ASAR, RADARSAT-1/2, SRTM, COSMO-SkyMed, TerraSAR-X, PALSAR, Sentinel-1A/B. Šių SAR raiška gali būti nuo 1 m (siauro ruožo), kuris apima nedidelę teritoriją arba iki 100 m (plataus ruožo), kuris apima santykinai didelę teritoriją (Brisco et al., 2015).

Sintetinės apertūros radarai (SAR) yra nuosekli kosminė radarų sistema, naudojanti aktyvius sensorius, kurie patys generuoja signalą ir todėl nereikia kitų energijos šaltinių, pavyzdžiui, Saulės energijos. SAR renka informaciją skrisdamas pagal savo orbitą ir sukuria aukštos raiškos nuotoliniu būdu gautus vaizdus. SAR pripažinti kaip labai svarbus informacijos šaltinis paviršinio vandens stebėjimams, kurie apima santykinai didelę teritoriją bei yra mažai veikiami aplinkos sąlygų (Lang et al, 2015). Pavyzdžiui, esant blogoms oro sąlygoms, kurios gali paveikti *in situ* matavimus, ar debesims, kurie visiškai eliminuotų optinių palydovinių duomenų informaciją, o SAR duomenys nėra limituojami, be to duomenys rinkami dieną ir naktį, nes nereikalinga Saulės energija. SAR skrisdamas siunčia signalus į žemės paviršių bei atsispindėjusį nuo žemės paviršiaus signalą priima ir išsaugo elektroniniu formatu (Schmid et al., 2018).

Pagrindinės radarų rūšys yra: altimetrai, skaterometrai ir sintetinės apertūros radarai (De Chiara, 2014).

Altimetrai – tai paprasčiausio tipo radarai, turintys tik vieną poliarizaciją bei skirti nustatyti tiriamojo paviršiaus nelygumams, aukščiams. Šio tipo radarai matuoja impulso kelionės laiką nuo altimetro iki žemės paviršiaus ir atgal, grįžtančio signalo formą bei stiprumą. Tai radaro tipas, kuris siunčia signalus vertikaliai Žemės paviršiui dėlto vaizdai būna siauro ruožo. Kita radarų rūšis - skaterometrai paprastai apima didelę teritoriją ir matuoja paviršiaus nelygumus, sukeltus vėjo. Skaterometrai siunčia signalus įstrižai, todėl vaizdai būna plataus ruožo. Skaterometrai naudojami aukštos rezoliucijos, kuri gali siekti 50 cm (Cappela, 2020), žemės paviršiaus vaizdams sukurti, jie paprastai turi keletą poliarizacijų. Signalas siunčiamas įstrižai dėl to atsiranda geometrinių neatitikimų SAR vaizde (1 pav.).



1 pav. Supaprastinta sintetinės apertūros radaro (SAR) geometrinė struktūra (Osmundsen et al, 2009).

Skirtingo ilgio SAR bangos vadinamos bangų ruožais, kuriems yra priskiriamos raidės, tokios kaip: P, L, S, C, X, Ku, K, Ka (1 lentelė).

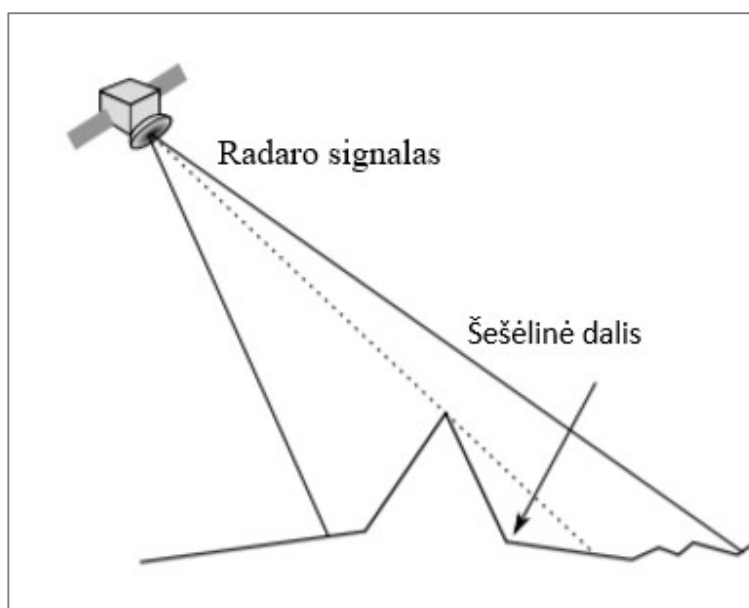
Atliekant darbus su SAR svarbu žinoti koks yra SAR bangos ilgis, nes skirtingo dažnio bei ilgio bangos skirtingai reaguoja į paviršių ir skirtingai prasiskverbia į žemės paviršių, kuo trumpesnės bangos tuo mažiau jos geba prasiskverbti pro augaliją, vandens paviršių ar dirvožemį.

1 lentelė. SAR bangų ruožai ir jų ilgis bei dažnis.

Poliarizacija	Bangos ilgis (cm)	Dažnis (GHz)
P	30-100	0,3-1,0
L	15-30	1,0-2,0
S	7,5-15	2,0-4,0
C	3,75-7,5	4,0-8,0
X	2,4-3,75	8,0-12,5
Ku	1,67-2,4	12,5-18,0
K	1,13-1,67	18,0-26,5
Ka	0,75-1,13	26,5-40,0

Esant topografiniams nelygumams (kalvos, kalnai, tanki augalija) atsiranda signalo trumpinimas priekinėje nelygumo dalyje, kas lemia mažesnę pikselių plotą nei yra realus paviršiaus plotas. Priklausomai nuo radaro spindulio kampo dydžio pikseliai bus labiau paveikti (kuo mažesnis

kampas, tuo labiau paveikta geometrija). Kai kuriais atvejais netgi gali būti pikselių persidengimas, kas lemia labai dideles grįžtančio signalo reikšmes. Šios vietos gali būti atskirtos pagal išskirtines reikšmes palyginus su aplinkiniais objektais. Šešėlinėje kalvos pusėje susidaro šešėlio efektas, kur teritorijoje nėra užfiksuojama radaro spindulių. Ypač kalvotose vietovėse reljefo formos gali sukelti geometrinius neatitikimus SAR vaizduose (2 pav.) (Lauknes, 2011).



2 pav. SAR signalą veikiančios reljefo formos (Lauknes, 2011).

Sentinel-1 yra pirmoji iš penkių Copernicus programos misijų, kurias vykdo Europos kosmoso agentūra (EKA). 2014 m. į orbitą buvo paleistas pirmasis Sentinel-1A palydovas, o 2016 m. – antrasis Sentinel-1B. Ši misija susideda iš dviejų sintetinės apertūros radarų, skriejančių poliarine orbita, kurie žemės paviršiaus stebėjimus vykdo visą parą, taip pat dar 2 Sentinel-1 (C ir D) palydovai yra suplanuoti paleisti ateityje.

Sentinel-1 turi vieną C-juostos sintetinės apertūros radarą, kurio bangų dažnis yra 5,4 GHz. Sentinel-1 C-juostos palydoviniai leidžia vykdyti nenutrūkstamą Žemės paviršiaus stebėjimą su dažniais SAR skrydžių pasikartojimais. Todėl tai leidžia sudaryti ilgas laiko eilutes per tam tikrą periodą, kas leidžia nuolat stebėti Žemės paviršiaus ir joje vykstančių gamtinių procesų pokyčius (Tsyganskaya et al, 2019).

Sentinel-1 SAR naudoja 4 poliarizacijas: HH+HV, VV+VH, VV, HH. Žemės paviršiaus tyrimams, susijusiems su žemėnaudos atskyrimu, taip pat ir užliejamų teritorijų kartografavimui naudojama dviguba poliarizacija: HH+HV arba VV+VH, dėl viengubos poliarizacijos tinkamų duomenų

stygiaus ir poliarimetrinei analizei būtinos daugiau nei vienos poliarizacijos, vienguba poliarizacija yra tinkama atlikti aukščio pokyčių analizei: vandenyno lygio kitimo analizę, ledynų tirpimą (Mouginot et al., 2019). Sentinel-1 naudoja iš anksto suprogramuotą operacinį metodą, kurio metu ties tam tikromis vietovėmis radaro poliarizacija pakeičiama, siekiant turėti nekintančius duomenų eilutės parametrus per ilgą laiką (Huang et al., 2018). Taip pat, tai yra viešai prieinama, nemokama palydovinė informacija ir jos poliarizacijos nekeičiamos skirtingai nei komerciniuose palydovuose, kurių parametrai priklauso nuo užsakovo pageidavimų.

### 1.1.2. SAR duomenų validavimas

SAR duomenų panaudojimui, kaip ir bet kokiems fiziniams bei nuotolinių tyrimų duomenims, vienas iš svarbiausių žingsnių yra validavimas (Fawcett et al., 1995). SAR palydovinių duomenų validavimui potvynio bei užliejamų teritorijų kartografavimo tyrimuose naudojami įvairūs duomenys, pvz.: Sentinel-2 optiniai vaizdai (Tsyganskaya et al., 2019), vizualinė validacija iš lėktuvo (Canisius et al., 2019), *in situ* matavimai su LiDAR (Montgomery et al., 2019). SAR duomenų validavimui bepilotės skraidyklės iki šiol nebuvo plačiai naudojamos, nors šie duomenys pasižymi geresne rezoliucija ir tikslesniais duomenimis negu optiniai palydoviniai duomenys ar vizualinė validacija iš lėktuvo, taip pat aprėpia didesnę teritoriją nei įprastiniai *in situ* matavimai ir gali pasiekti žmogui sunkiai prieinamas vietas (Yang et al., 2020). Kol kas bepilotės skraidyklės, pvz. fiksuoto sparno skraidyklės, dronai, nėra dažnai taikomi ir dar nepakeitė įprastinių duomenų rinkimo bei validavimo metodų, naudojamų potvynių ir užlietų teritorijų kartografavimui. Tačiau dronai vis dažniau naudojami įvairiose kitose studijose rinkti duomenis arba validuoti duomenims, pavyzdžiui sausumos objektų kartografavimo rezultatams (pastatams, medžiams, krūmynams) (Sorbelli et al., 2018), taip pat naudojami validuoti duomenims gautiems iš optinių palydovų, tokių kaip Pleiades-1B, kuris buvo naudojamas sukartografuoti Malaizijoje esančioms mangrovėms (Ruwaimana et al., 2018).

### 1.1.3 SAR panaudojimas užlietų teritorijų kartografavimui

Užlietų teritorijų ir potvynių kartografavimui yra naudojami įvairūs SAR duomenų klasifikavimo būdai: naudojant nekontroliuojamą (*unsupervised classification*) (Senthilnath et al., 2019), kontroliuojamą klasifikaciją (*supervised classification*) (Tsyganskaya et al., 2018), aktyvių kontūrų modelius (*active contour models*) (Tang et al., 2018), orientuota į objektą klasifikaciją (object-oriented classification) (Hoeser et al., 2020), pagal slenkstinę vertę tarp skirtingų poliarizacijų (Tiwari et al., 2020) bei santykio tarp dviejų periodų (užliejimo ir sausojo) (Clement et al., 2018), kurie leidžia atskirti

nepilnai užlietos augalijos plotus nuo pilnai užlietos teritorijos ir sausumos (Li et al., 2018, Tsyganskaya et al., 2019). Taip pat labai svarbu yra sukartografuoti ir atskirti užlietą teritoriją su į vandens paviršių išnirusia augalija, siekiant suprasti bendrą potvynio situaciją ir plotą. Tokia teritorija gali būti apibūdinta kaip vietovės, kuriose potvynio vanduo laikinai užsilieka po augalija (Tsyganskaya et al., 2018). Neatsižvelgiant į laikinai užlietos augalijos teritorijas galima suklysti apskaičiuojant bendrą potvynio situaciją. SAR duomenys yra naudingi šiems tyrimams ne tik dėlto, kad geba aprėpti didelę teritoriją, nepriklausomai nuo meteorologinių sąlygų, bet ir atpažinti po augalija esanti vandenį jeigu augalijos danga virš vandens paviršiaus nėra labai tanki (Brisco et al., 2015).

Lygus vandens paviršius yra labai gerai ir viena kryptimi atsispindintis paviršius ir todėl jo SAR signalo atgalinės sklaidos koeficientas yra mažas. Šios teritorijos, dėl šios savybės gali būti lengvai atskiriamos nuo ne tokių lygių paviršių sausumoje, kurių SAR atgalinės sklaidos koeficientas yra gerokai didesnis. Tačiau laikinos užlietos augalijos atskyrimas nuo vandens bei sausumos yra sudėtingesnis, kadangi jos atgalinė sklaida yra didesnė dėl to, kad tai yra nelygus paviršius ir signalas gali nuo lygaus vandens paviršiaus atsimušti į augaliją, sukeldamas dvigubą atsimušimą ar net keletą atsimušimų į tokius vertikalius objektus, kaip medžių kamienai ar šakos. Dėl šių priežasčių gana mažos atgalinės sklaidos reikšmės gali labai stipriai padidėti ir turėti reikšmes, panašias į sausumai būdingas atgalinės sklaidos reikšmes (Pulvirenti et al., 2012).

## **1.2. Palydovinių SAR duomenų panaudojimas aplinkotyroje Lietuvoje ir pasaulyje**

Lietuvoje iki šiol yra santykinai nedaug mokslinių tyrimų aplinkos tyrimų srityje, kuriuose būtų panaudojami palydoviniai sintetinės apertūros radarų (SAR) duomenys. Daugiau tyrimų buvo padaryta naudojantis optiniais palydoviniais duomenimis. Naudojant MERIS (*MEdium Resolution Imaging Spectrometer*), OLCI (*Ocean and Land Colour Instrument*) optinio sensoriaus duomenis Baltijos jūros Lietuvos priekrantėje ir Kuršių mariose buvo atliktas chlorofilo a – augalų ir fitoplanktono pagrindinio pigmento - kiekio kartografavimas, įvertintas Kuršių marių vandenų daromas poveikis priekrantės vandenų ekologinei būklei (Vaičiūtė et al., 2012, Vaičiūtė et al., 2021). SAR duomenys buvo naudojami pakrančių apvelingo tyrimams pietrytinėje Baltijos jūros dalyje (Kozlov et al., 2012, Dabulevičienė et al., 2018), melsvabakterių sukeliama vandens „žydėjimo“ tyrimams, kurie buvo derinami su MERIS ir OLCI optinių palydovinių duomenų tyrimais (Adamo et al., 2013, de Santi et al., 2019). SAR duomenys taip pat buvo panaudoti ledo kartografavimui siekiant nustatyti tinkamas teritorijas dreisenų (*Dreissena polymorpha*) ūkiams įkurti (Bagdavičiūtė et al., 2018) bei ledo paplitimo ir jo kaitos tyrimams Kuršių mariose (Izdelytė et al., 2019). Lietuvoje gaunami duomenys apie potvynius iš SAR duomenų per

„Copernicus Emergency Management Service“, kurių tikslas sudaryti užlietų teritorijų žemėlapius visuomenei, siekiant apsaugoti turtą bei gyvybes, tačiau šie duomenys užsakomi savivaldybių tada, kai potvyniai yra pavojingi.

Pasaulyje SAR duomenys yra naudojami atliekant įvairius tiriamuosius darbus, pvz., užlietų pievų kartografavimui, dirbamų žemės plotų grunto drėgmės stebėjimui, naftos išsiliejimų ir laivų aptikimui, geomorfologiniams stebėjimams atlikti. Pasauliniu mastu potvynių kartografavimas vykdomas gana intensyviai ir globaliai bei apima platų spektrą su potvyniais susijusių problemų. Tsyganskaya, et al. (2018) potvynių užliejamų teritorijų bei atvirų vandens telkinių kartografavimui Namibijoje naudojo SAR duomenis, kurie buvo apdorojami naudojant nekontroliuojamą klasifikaciją (*unsupervised classification*) bei kontroliuojamąją klasifikaciją (*supervised classification*). SAR duomenys buvo panaudoti išskirti užlietas teritorijas, kuriose susidaro palankios sąlygos veistis maliariniams uodams. Šiems uodams veistis tinkamiausios yra drėgnos užlietos pievos, todėl buvo bandoma atskirti atvirą vandenį, sausumą bei pievas su iš dalies užlieta augalija, naudojant daugiau poliarizacijų bei jų derinių (Hardy et al., 2019).

### **1.3. Užliejamų teritorijų susidarymas, jų ekologinė reikšmė**

Vietovės, kuriose užliejimo vanduo užsilaiko ilgai gali lemti įvairūs veiksniai: nuosėdos, žemėnauda, topografija ar antropogeninė veikla. Vietos, kur ilgai užsistovi vanduo, yra dažniausiai sukurtos žmogaus antropogeninės veiklos (kliūčių vandeniui nubėgti, dirbamų laukų) (Grzybowski, 2019). Vandens užliejamų teritorijų suvaldymui vienas dažniausiai naudojamų būdų yra polderių statymas. Polderiais vadinama žema teritorija, nuo nuolatinio ar periodinio užliejimo apsaugota pylimais, nusausinta ir sukultūrinta. Vandens perteklius iš tokios teritorijos ištekėti savitaka dažniausiai negali, todėl jį reikia pašalinti mechaniniu būdu (siurblinėmis). Tačiau tai sukelia daug ekologinių problemų, nes yra pakeičiamos upių vagos, jos praranda savo natūralią tėkmę, pasikeičia upės substratas ir žuvų nerštavietės (Auerswald et al., 2019). Taip pat tai sudaro puikias sąlygas užsistovėti vandeniui siurblinių teritorijose, kur vanduo gali išlikti beveik visus metus nenusekęs ir netgi sudaryti sąlygas didesniems užliejimams nei būtų įprasta be polderių (Ferdous et al., 2019). Tokios, nuolat užlietos teritorijos sudaro tinkamas sąlygas šiltnamio dujų – metano išsiskyrimui, kuris yra 25 kartus didesnis nei CO<sub>2</sub> sulaikymas toje pačioje teritorijoje (Whalen et al., 2005; Matthews et al., 2008). Dėl užlietų, drėgnų teritorijų pasikeičia augalų rūšių pasiskirstymas, užlietos teritorijos gali daryti įtaką augalijos augimui (Kopecký et al., 2021), taip pat gali keistis kiti natūralūs procesai, kaip vandens judėjimas upės baseine (Fan et al., 2019).

Vandens užsistovėjimas priklauso ir nuo nuosėdų tipo, pavyzdžiui smėlis su žvirgždu, kurio granuliu dydis siekia  $>2$  mm yra pralaidesnis vandeniui nei smulkesnės granulometrijos nuosėdos, tokios kaip aleuritas (0,005 – 0,5 mm) ar molis ( $<0,005$  mm) (Chelovechkova et al., 2018). Vietovės, kurių nuosėdų granulometrinė sudėtis smulkesnė, yra linkusios ilgiau išlaikyti vandenį paviršiuje (Souza et al., 2021). Reljefo formos gali sukelti tinkamas sąlygas užsilaikyti vandeniui, žemai esančios teritorijos ar daubos yra labiau linkusios išlaikyti vandenį nei aukščiau esantys objektai (kalvos), su stačiu šlaitu (Raduła et al., 2018). Taip pat vandens užsilaikymui po užliejimo gali daryti įtaką žemėnauda, tanki augalija, kuri sugeba sugerti daugiau vandens, todėl tokiose vietose mažesnė tikimybė užsilaikyti vandeniui negu antropogeniškai stipriai paveiktose teritorijose: dirbamose laukuose ar esant dirbtiniam paviršiui (Mousavi et al., 2019).

Nemuno deltos hidrologinius procesus labiausiai lemia vandeningumo pokyčiai visame upės baseine. Didelius vandens lygio pokyčius deltoje sukelia ledo reiškiniai. Susidarius ledo grūstims, jas lydi vandens lygio paaukštėjimai (Žaromskis, 2013). Didžiausi potvyniai Nemuno deltoje susidaro, kai Nemuno upėje ledonešis jau prasidėjęs, o deltos atšakose ir Kuršių mariose dar yra ledo (Rainys, 1977). Lietaus sukelti poplūdžiai susidaro tuomet, kai į upės baseiną per parą iškrenta 30-50 mm kritulių. Potvyniu ar poplūdžiu laikomas toks vandens pakilimas, kai maksimalūs debitai didesni, palyginti su tų metų vidutiniu debitu. Poplūdžiai – upės vandens režimo fazė, palyginti trumpalaikis ir neperiodinis vandens lygio pakilimas upėje, susijęs su sniego arba ledynų tirpsmu bei liūtimis, o potvynis tai - kasmetinis, reguliarus vandens lygio pakilimas upėje. Vandens lygį Nemuno deltos šakose labiausiai lemia bendras upės nuotėkis (Žaromskis, 2013).

Pamariui yra būdingi pavasario bei rudens–žiemos potvyniai, kada apsemiami ištisi vasarinių polderių plotai, išskyrus Ventės rago moreninį kalvagūbrį, žiemos polderius bei vasaros polderių santykinai aukštesnes vietas. Pavasario potvyniai Nemuno žemupyje prasideda maždaug kovo 19 d. Vidutinė potvynio trukmė – 16 dienų, maksimali – 51 diena (Žaromskis, 2013). Maksimalų lygį potvynis pasiekia praėjus 6–8 dienoms nuo upės išsiliejimo iš vagos. Ledo dangos susidarymas Nemune ir jo intakuose, išskyrus Miniją, prasideda gruodžio 19–23 d. Pavasario ledonešio pradžia – kovo 16–20 d. Potvyniai Pamaryje, priklausomai nuo jų aukščio, užlieja gana dideles Nemuno deltos teritorijas. Nemuno deltoje potvynio vandenimis užliejama zona apima teritoriją nuo Rambyno kalno iki Kuršių marių. Bendras užliejamas teritorijos plotas gali siekti apie 600 km<sup>2</sup>, iš jų apie 400 km<sup>2</sup> tenka dešiniojo kranto deltai, priklausančiai Lietuvai, likusi dalis tenka kairiojo kranto deltai, esančioje Kaliningrado srityje, Rusijoje (Žaromskis, 2017). Lietuvos teritorijoje vanduo gali išplisti iki 56 km nuo vagos, kai tuo metu Rusijoje, dėl ten esančių aukštesnių polderių potvynis siekia iki 1,5 km pločio juosta. Potvynių

metu upių vandenys neišsitenka upių vagose ir išsilieja į slėnius bei salpas. Šie potvyniai vyksta pavasarį, o vasarą ir rudenį vyksta poplūdžiai, vasarą ar žiemą - nuotėkiai. Ši potvynių sukeliama vandens tėkmės kaita turi įtakos ir upių vaginiams procesams bei jose įsikūrusių vandens ekosistemų biologinei įvairovei (Vaikasas, 2007).

Nemuno deltoje esančios užliejamos pievos bei Kuršių marios yra labai svarbios daugiafunkcinės ekosistemos dalis, kurioje vyksta medžiagų apykaitos bei energijos pasikeitimo procesai. Nemuno deltoje esanti augalija ir dirvožemis yra lyg natūralus filtras iš upės atitekančių maistmedžiagų (ypač azoto ir fosforo), prieš Nemuno vandeniu patenkant į Kuršių marias o po to ir į Baltijos jūrą (Katutis, 2007).

Užliejamų teritorijų kartografavimas ir monitoringas yra atliekamas Aplinkos Apsaugos Agentūros (AAA), siekiant įgyvendinti 2007 m. priimtą Potvynių direktyvą (2007/60/EC), kurios pirmo etapo tikslas buvo iki 2015 m. gruodžio 22 d. sukurti potvynių rizikos įvertinimo ir valdymo sistemą, siekiant sumažinti neigiamas potvynių pasekmes žmonių sveikatai, aplinkai, kultūros paveldui ir ekonominei veiklai. Šį tikslą Lietuva pasiekė ir šiuo metu vykdo antrąją šios direktyvos įgyvendinimo etapą, kurio vienas iš tikslų yra sudaryti potvynių grėsmės ir potvynių rizikos žemėlapius.

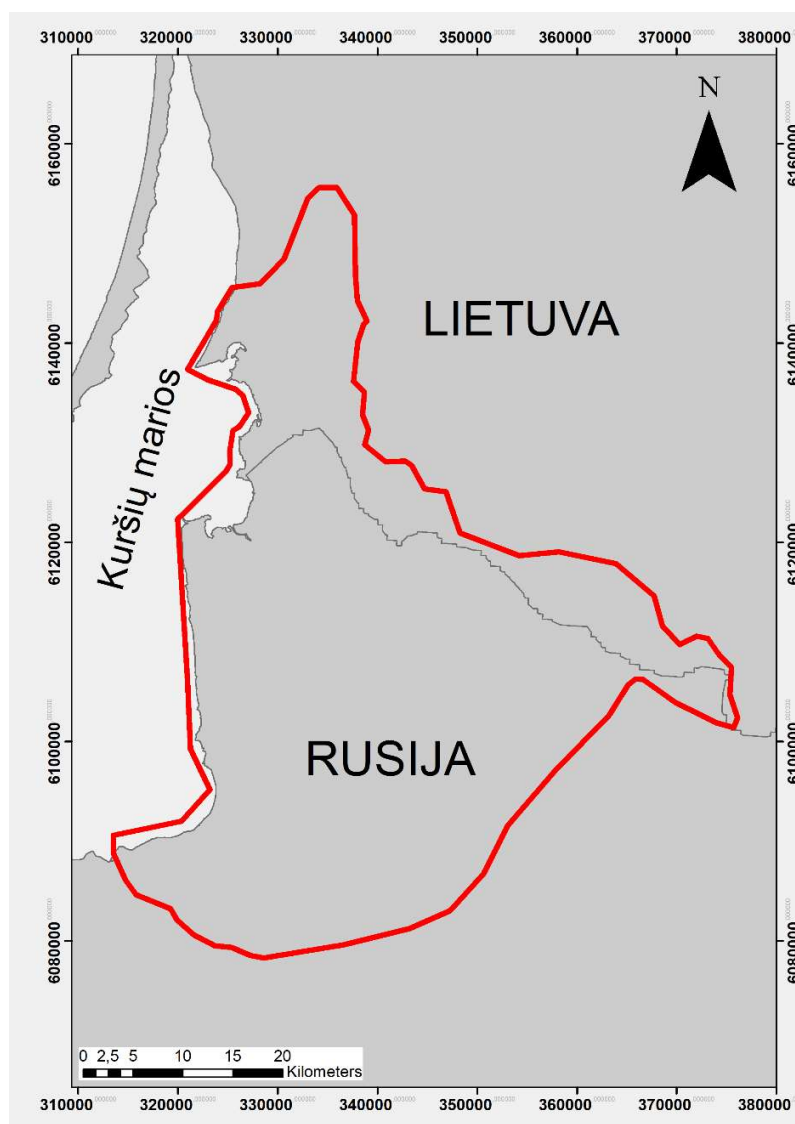
## II. METODAI

### 2.1. Tyrimo vieta

Nemuno delta yra vakarų Lietuvoje (Šilutės rajone) ir Rusijos Kaliningrado srityje (Polesko rajone), ties Nemuno įtekėjimu į Kuršių marias. Prasideda žemiau Tilžės, Nemuno vagai skylant į Giliją (Matrosovką) ir Rusnę. Gilija teka į pietvakarius per Rusijos teritoriją, o Rusnė toliau šakojasi į Atmatą ir Skirvytę. Tarp jų yra pagrindinė deltos dalis – 8 protakų suskaidytos salos (didžiausia – Rusnės sala) (Gudelis, 1998). Nemuno delta, pakilusi vos kelis metrus virš jūros lygio, yra žemiausia Baltijos pajūrio žemumos dalis, patenka į Nemuno deltos žemumą, todėl jai tenka įprasti pavasariniai bei rudeniniai potvyniai, sukelti didelio kritulių kiekio Nemuno upės baseine (Žaromskis, 2013).

Dėl Nemuno deltos pietinės ir šiaurinės ribos yra keletas nuomonių. Yra keletas kriterijų kaip galima išskirti Nemuno deltos ribas: pagal užliejamumo galimybes (Grigat, 1931), pagal skirtingo kraštovaizdžio rajonavimą (Basalykas, 1961) bei pagal maksimalaus aptvango-inundacijos kontaktinį aukštį (Gudelis, 1988). V. Gudelis apibrėžia ribą šiauriau Šilutės miesto, į deltos lygumą įtraukdamas Tenenio ir Minijos upių žemupius (Žaromskis, 2013). Pietinė Nemuno deltos riba yra ties Deimenos upe, esančia Rusijoje, kuri jau priklauso Priegliaus upės baseinui (Gudelis, 1998).

Šiame darbe Nemuno deltos teritorija yra apibrėžta pagal maksimalaus aptvango-inundacijos kontaktinį aukštį (Gudelis, 1988). Nemuno deltos vidaus vandenys sudaro Kuršių marių akvatorijos rytinis pakraštys su Kniaupo įlanka ir tankus sausumos vandenų hidrografinis tinklas – Nemuno deltinis upynas, žiotinės protakos, lagūninis (Krokų Lankos) ir senvaginiai ežerai (Žiogiai), polderiniai kanalai, žuvininkystės tvenkiniai, deltinių aukštapelkių ir žemapelkių kompleksai bei negilūs gruntiniai vandenys (3 pav.).

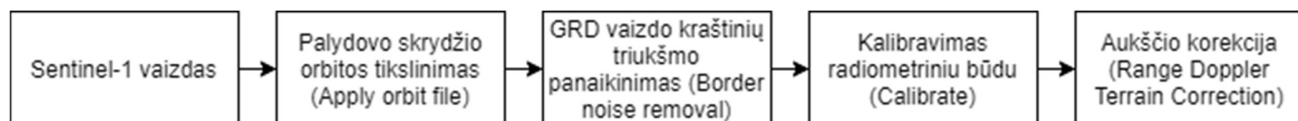


3 pav. Tyrimo vieta: Nemuno delta (koordinacių sistema: LKS-94).

## 2.2. SAR duomenų pirminis paruošimas

Užliejamų teritorijų kartografavimui naudojami 10 m erdvinės rezoliucijos EKA (Europos kosmoso agentūra) Sentinel-1 SAR GRD (*Ground Range Detected*) palydovų 2015-2019 m. duomenys, kurie apdorojami naudojant Google Earth Engine platformą ir ArcMap 10.5 programinę įrangą. Šiame tyrime iš viso buvo panaudota 660 Sentinel-1 vaizdų, iš kurių buvo sukurti 220 atskirų laikotarpių vaizdai, iš kurių analizei panaudoti buvo 173 vaizdai, dėl įvairių trukdžių, tokių kaip sniegas. Buvo atliktas pirminis SAR duomenų paruošimas (*pre-processing*), kurio metu patikslinama SAR skrydžio

orbita, pašalinami trukdžiai atsiradę SAR vaizdo kraštuose, vykdomas kalibravimas, atliekama aukščio korekcija (4 pav.).



4 pav. SAR duomenų pirminio paruošimo metodika.

Palydovo skrydžio orbitos vektoriai yra atsiunčiami kartu su SAR vaizdu, kurio metaduomenys nėra tikslūs, todėl pirmiausia atliekamas SAR duomenų tikslinimas. Tiksli palydovo orbita gali būti nustatyta ir sugeneruota kelios dienos po palydovo skrydžio (Filipponi, 2019). Patikslintos palydovo skrydžio orbitos buvo gautos, naudojant Google Earth Engine, kur šie failai jau yra įrašyti į paruoštus palydovinius vaizdus.

Toliau vykdomas palydovo vaizdo kraštinių triukšmo panaikinimas, kuris atsiranda iš abiejų SAR vaizdo pusių pakeliui palydovo skrydžio trajektorijos (Ali et al., 2018). Vaizdo kraštinių triukšmas atsiranda, kompensuojant Žemės paviršiaus kreivės pokytį. Atliekant Žemės paviršiaus kreivės pokyčio kompensavimą, azimutas bei diapozonas susispaudžia, dėl ko atsiranda radiometriniai artefaktai ties vaizdo kraštinėmis (Miranda et al, 2018).

Sekantis žingsnis buvo atlikti SAR duomenų radiometrinį kalibravimą. Sentinel-1 vaizdai yra kalibruojami radiometrinio būdu, (1 lygtis) (Europos kosmoso agentūra):

$$reikšmė(i) = \frac{|DN_i|^2}{A_{i2}}, \quad (1)$$

kur DN yra kiekvieno pikselio skaitmeninė reikšmė Sentinel-1 vaizde (atspindėto signalo vertė) ir A yra informacija, kuri reikalinga SAR atspindį paversti į fizines reikšmes. Ši lygtis transformuoja kiekvieno pikselio DN į atgalinio atspindžio koeficientą pagal tiesinę skalę. Papildytasis Lee filtras (refined Lee filter) (Lee, 1981), kurio pikselio dydis yra 3 x 3 originalaus vaizdo pikselio dydžio, yra naudojamas siekiant sumažinti radiometrinį triukšmą (deformuotus signalo pikselius). Šis pikselių dydis naudojamas siekiant išsaugoti stabilią, nekintančią erdvinę rezoliuciją.

Vėliau buvo vykdomas geokodavimas, naudojant skaitmeninį aukščio modelį (angl. digital elevation model - DEM) siekiant patikslinti topografinius aukščius SAR duomenyse, kurie gali įtakoti atgalinį atspindį. Geometrinės korekcijos erdvinė rezoliucija yra mažesnė nei 10 metrų. Geometrinė korekcija tai yra Sentinel-1 GRD (*Ground Range Detected*) duomenų pakeitimas iš nuožulnios paviršiaus

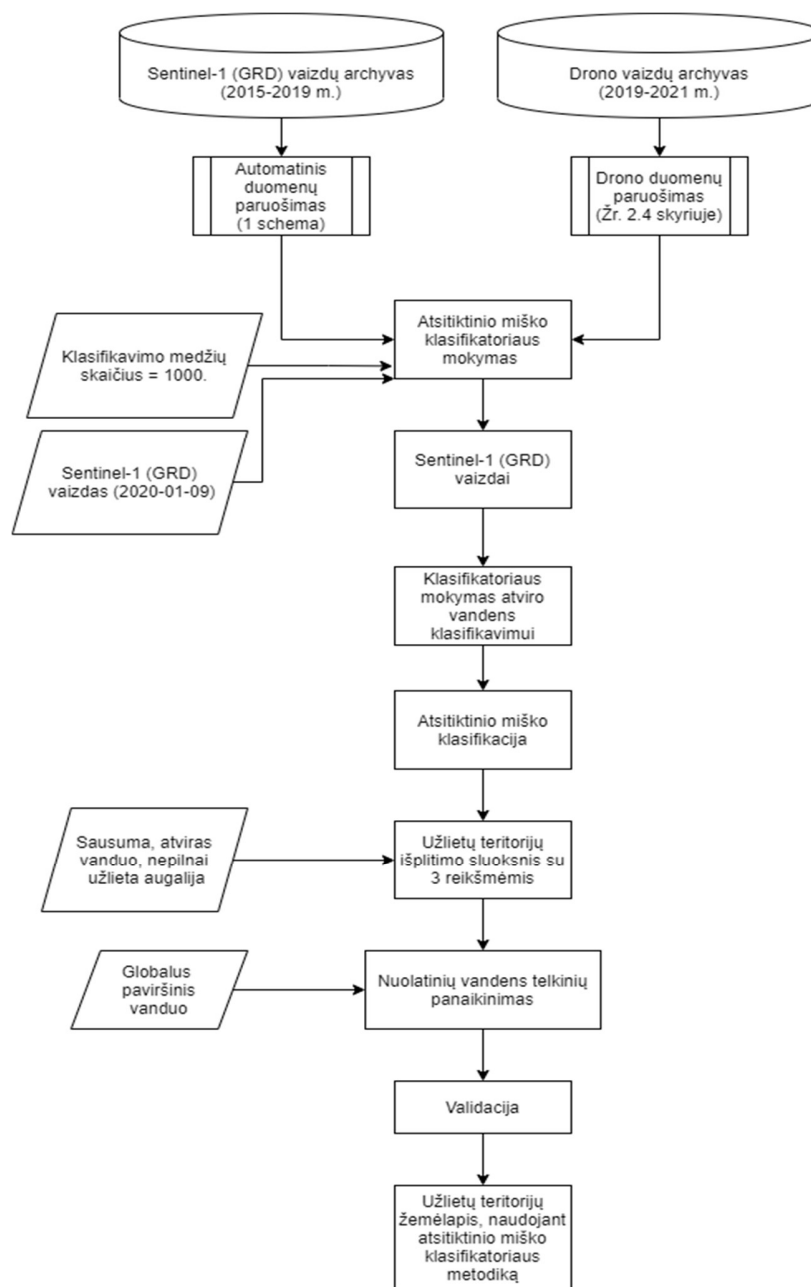
geometrijos į topografinį žemėlapi su tinkama koordinacių sistema. Tai daroma dėl to, kad SAR signalas gali atsispindėti nuo nelygių objektų skirtingu kampu ir gautas signalas gali neatitikti realaus paviršiaus savybių. Tinkamiausias būdas geometrinei aukščio korekcijai atlikti yra Range-Doppler aukščio korekcija. Metodui reikalingi: aukščio modelis (DEM), orbitos ir palydovo greitis, kurie gaunami iš paties palydovo. Šio pirminio apdorojimo žingsnio tikslas yra pataisyti kiekvieno vaizdo pikselio geografinę padėtį bei atspindį.

## **2.3. Užliejamų teritorijų kartografavimas panaudojant SAR duomenis**

Bendras užlietos teritorijos išplitimas buvo skaičiuojamas dviem metodais: atsitiktinio miško klasifikatoriaus ir skirtumų tarp dviejų laikotarpių (sausėjo ir drėgnojo). Tiriamasis laikotarpis yra nuo 2015 m. sausio 1d. iki 2019 m. gruodžio 31 d.

### **2.3.1. Atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodas**

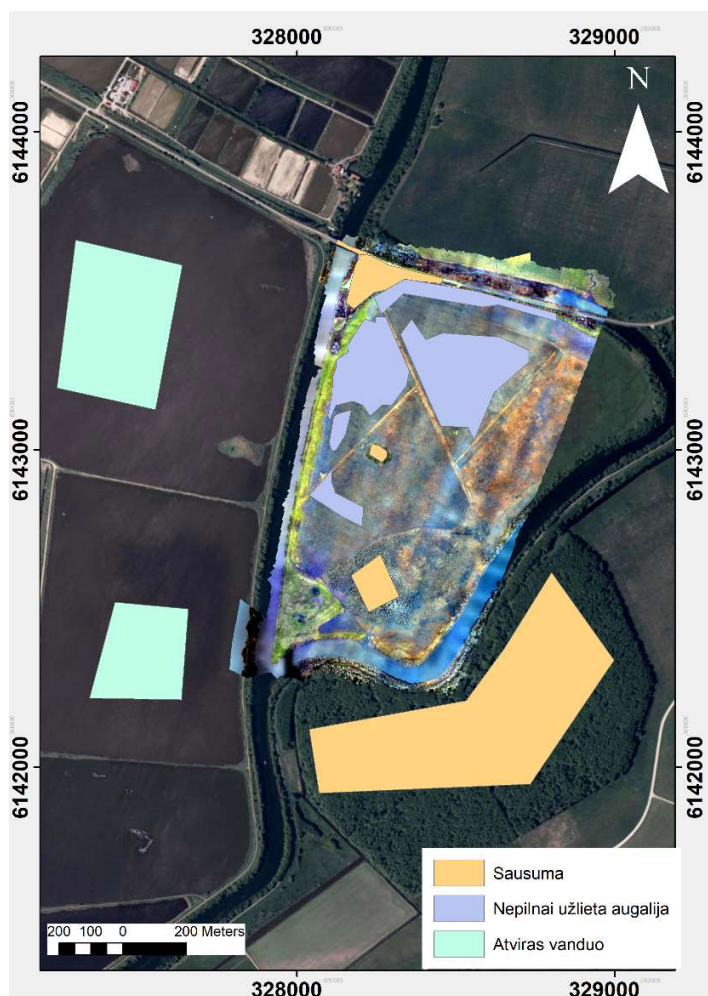
Atsitiktinio miško klasifikatorius (toliau – AMK metodas, ang. Random forest classification) buvo naudojamas užlietų teritorijų ir sausumos klasifikavimui. Šis algoritmas buvo pasirinktas dėlto, kad geba sugrupuoti didelį duomenų kiekį, kas svarbu tiriant teritorijas su daug pikselių (Belgiu, Drągu, 2016) Atsitiktinio miško klasifikacijos algoritmas grupių atskyrimui naudoja keletą klasifikacijų bei regresijos medžių. Šiai klasifikacijai atlikti buvo naudojama Google Earth Engine Code Editor platforma, kuri naudoja JavaScript programinę kalbą, ši platforma yra atviro kodo ir naudoja Google serverius, kas leidžia atlikti daug resursų reikalaujančias užduotis gana greitai ir neapkraunant darbo įrankio – kompiuterio. Pagrindiniai parametrai, kurie buvo naudojami klasifikavimui: regresijos medžių skaičius (buvo nustatytas 1000). Šio algoritmo rezultatų validavimas buvo vykdomas naudojant drono pagalba surinktą informaciją, kur buvo pasirinkti mokymui naudoti poligonai (5 pav., Drono vaizdų apdorojimo metodai aprašyti 2.4. skyriuje).



5 pav. Duomenų paruošimas, naudojant atsitiktinio miško klasifikatorių.

Pritaikius atsitiktinio miško klasifikatorių teritorija klasifikuojama į 3 klases: atvirą vandenį, nepilnai užlietus augalijos plotus ir sausumą. Vėlesniame etape atviras vanduo yra panaikinamas ir atliekama atskira atviro vandens klasifikacija su klasifikuojamu vaizdu, kurio tikslas yra išvengti neteisingos klasifikacijos šiltuoju periodu, kuris sukeliama žaliuojančios augalijos. Toliau iš duomenų yra išfiltruojami nuolatiniai vandens telkiniai (upės, ežerai, marios), kad jie nebūtų įskaičiuoti į bendrą užlietų teritorijų statistiką, tam naudojamas globalaus žemės paviršinio vandens duomenų sluoksnis (EU

Commission, 2019). Galutinis šio metodo rezultatas yra gaunami užlietų teritorijų išplitimo žemėlapiai su trimis reikšmėmis, kurios reprezentuoja atvirą vandenį, nepilnai užlietos augalijos plotus ir sausumą. Sudaryti žemėlapiai naudojami tolimesnei duomenų analizei bei statistikai (6 pav.).

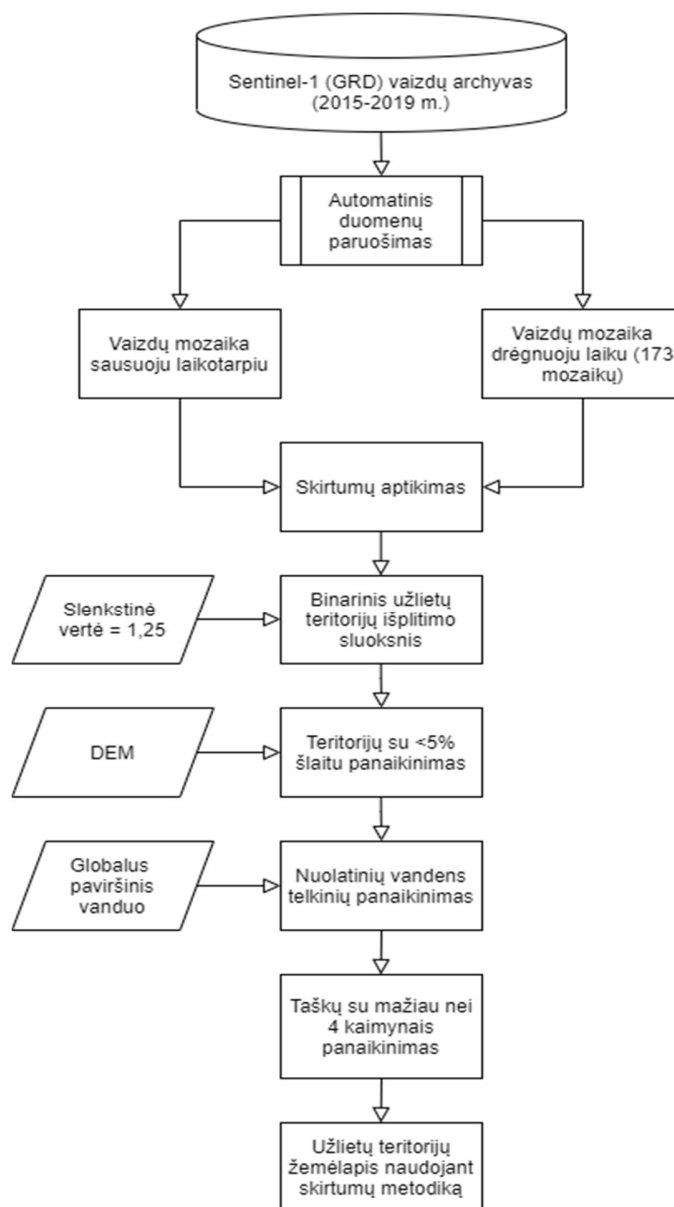


6 pav. Atsitiktinio miško klasifikatoriaus mokymui naudoti poligonai. Kintai, 2020-01-09.

### 2.3.2. Skirtumų tarp sausojo ir užliejimo laikotarpių metodas

Skirtumų tarp sausojo ir užliejimo laikotarpių metodas (toliau – skirtumų metodas, ang. *Change Detection*) skirtas aptikti užlietoms teritorijoms, naudojant Sentinel-1 SAR palydovinius duomenis (Clement et al., 2019). Užlietos teritorijos aptinkamos apskaičiuojant skirtumus tarp dviejų skirtingų laikotarpių (drėgnojo ir sausojo). Šiam metodui atlikti naudojama atvirojo kodo Google Earth Engine platforma, kuri naudoja JavaScript programinę kalbą. Pirmame duomenų apdorojimo etape išsirenkami 173 SAR vaizdai 2015-2019 m. laikotarpyje, kiekvieno vaizdo, skirtumų metodo paruošimui

pasirenkami 2 laikotarpiai: (drėgnasis ir sausasis, kuris atrenkamas pagal sausiausią kiekvienų tyrimo metų laikotarpį), iš kurių bus daromi sujungti vaizdai ir jie bus lyginami. Atlikus duomenų paruošimo etapą, sudaromi 2 sujungti vaizdai iš kelių Sentinel-1 vaizdų, kurių persidengiančių pikselių reikšmės yra suvidurkinamos. Vaizdai yra palyginami tarpusavyje (jų kiekvieno pikselio reikšmės yra padalinamos iš kito sluoksnio toje pačioje vietoje esančių pikselių reikšmės) ir sudaromas naujas sluoksnis, kuris turi santykinės dviejų vaizdų reikšmes. Turint sujungtų vaizdų santykinę reikšmių sluoksnį, pritaikoma slenkstinė vertė, kuri yra pasirenkama pačio tyrėjo (rekomenduojama: 1,25 (UN-SPIDER), šio darbo atveju naudota slenkstinė vertė lygi 1,25). Išrinkus slenkstinę vertę sudaromas naujas, binarinis sluoksnis su dviem reikšmėmis, kurios reprezentuoja neužlietas teritorijas (0) bei užlietas teritorijas (1) (7 pav.).



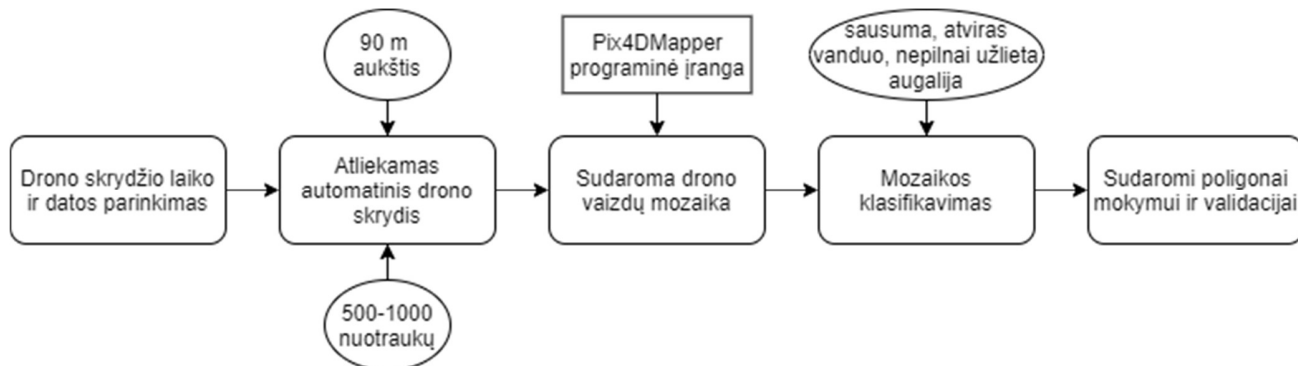
7 pav. Duomenų paruošimas, naudojant skirtumų metodą.

Sekančio duomenų paruošimo etapo metu atliekamas paviršių, kurių šlaito dydis didesnis nei 5 % panaikinimas, kuriam naudojamas DEM modelis, kadangi esant statesniam šlaitui, dėl šešėlinimo efekto, gali susidaryti klaidingos reikšmės. Šis etapas sumažina tikimybę gauti klaidingus rezultatus. Toliau iš duomenų yra išfiltruojami nuolatiniai vandens telkiniai (upės, ežerai, marios), kurie neįskaičiuojami į bendrą užlietų teritorijų statistiką, tam naudojamas globalaus žemės paviršinio vandens duomenų sluoksnis (EU Commission, 2019). Taip pat panaikinamos vietovės, kurių pikseliai turi mažiau nei 4 pasikartojančius kaimyninius pikselius, šios dalies tikslas yra dar labiau sumažinti radiometrinių

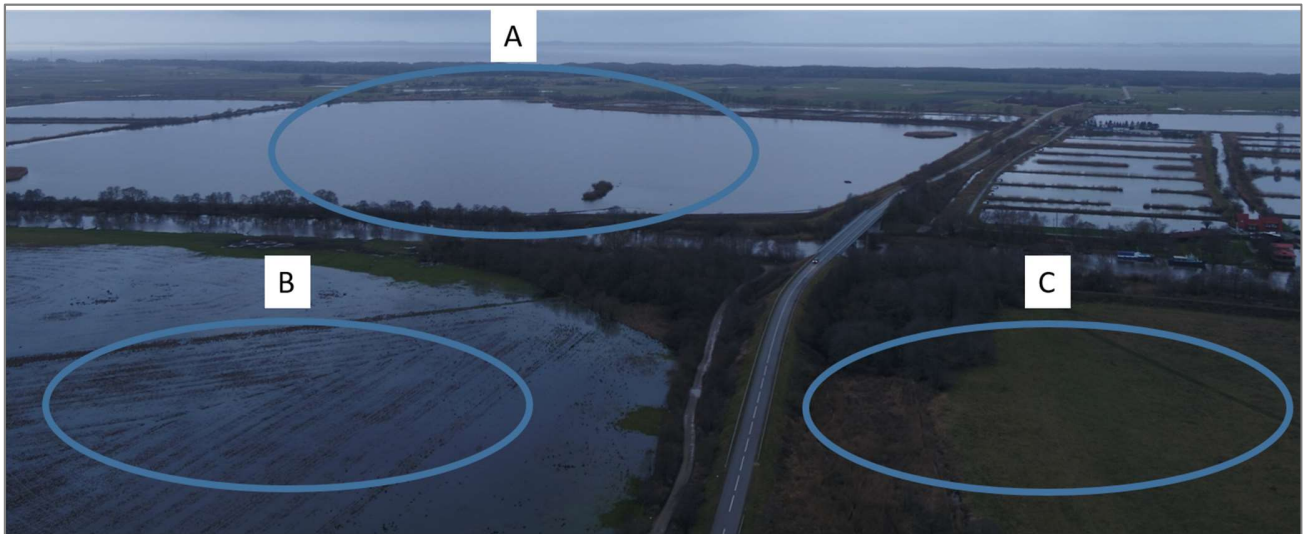
triukšmą, kurio nepavyko pilnai panaikinti naudojant papildytą Lee filtrą (Lee, 1981). Kaip galutinis šio metodo rezultatas yra gaunami užlietų teritorijų paplitimo binariniai (sausumos ir užlietos teritorijos) žemėlapiai, kurie naudojami tolimesnei duomenų analizei.

## 2.4. Drono duomenų paruošimas

Dronu surinkti duomenys buvo naudojami užliejamų plotų, sukartografuotų panaudojant du SAR duomenų apdorojimo metodus, validavimui (8 pav.). Buvo panaudotas DJI Inspire 2 dronas ant kurio sumontuota Zenmuse X5S kamera. Drono skrydis vykdomas vietoje, kuri labiausiai reprezentuotą visą tiriamąją teritoriją: dinamiški ir dažni užliejimai, tyrimo vietose yra ir teritorijos su nepilnai užlieta augalija, yra pilnai patvinsusių ir visai neužlietų plotų (9 pav., A, B ir C), taip pat šios teritorijos neįeina į pasienio ruožą, dėl to šioje teritorijoje nereikia gauti leidimo iš Valstybės sienos apsaugos tarnybos norint skraidinti bepilotę skraidyklę, kas užtikrina sklandų ir greitą duomenų surinkimą. Skrydis su dronu buvo atliekamas tuo pačiu metu kai vyko Sentinel-1 skrydis virš teritorijos ir kuomet tiriami plotai buvo užlieti. Skrydis dronu atliekamas esant skrydžiui saugioms oro sąlygoms: silpnas vėjas, nėra kritulių, temperatūra ne žemesnė nei  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , geras matomumas.

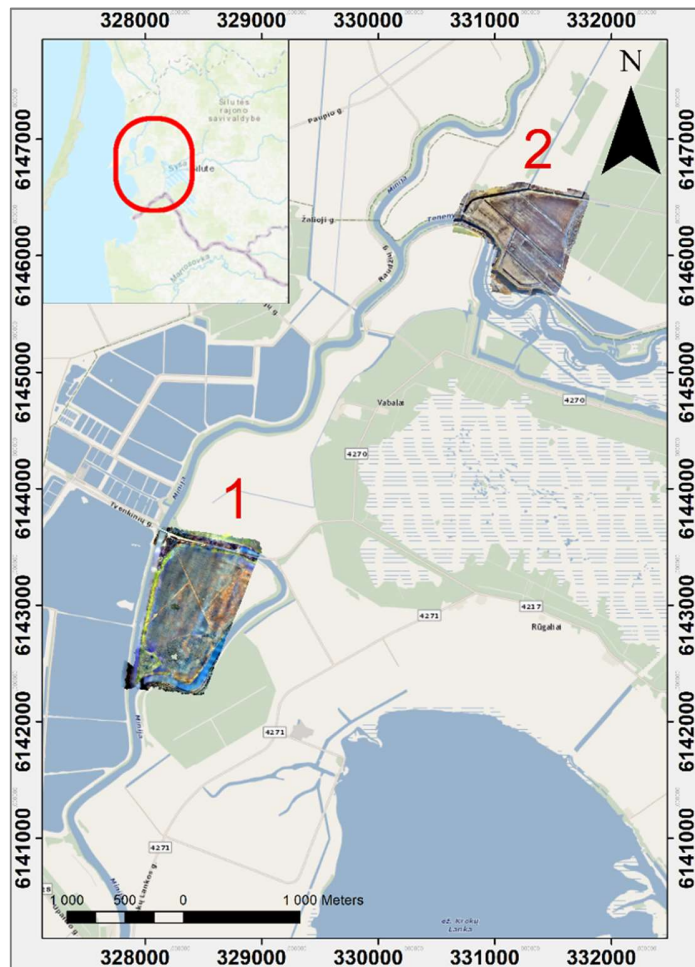


8 pav. Drono duomenų paruošimo schema.



9 pav. Skirtingos dangos užliejimo laikotarpiu: A – atviras vanduo, B – nepilnai užlietos augalijos plotai, C – neužlieta teritorija. (Nuotrauka daryta: 2020-01-09).

K artografavimui dronu buvo pasirinktos dvi tyrimo vietos: 1. – dirbamas laukas, šalia Kintų žuvininkystės ūkio, prie kelio Kintai – Šilutė, Povilų kaimas, Kintų seniūnija, Šilutės rajonas (327974, 6144380; 327551, 6142197; 328464, 6142250; 329244, 6144023 (LKS-94)), kur buvo padaryti 3 drono skrydžiai: 2019-12-10, 2020-01-09, 2021-01-21 (sniego danga buvo užklojusi vandenį todėl nebuvo galima įvertinti tikslumo), 2. – dirbamas laukas prie Sakūčių miško, šalia Klumbių siurblynės, Kintų seniūnija, Šilutės rajonas (330812, 6146665; 331786, 6146516; 331516, 6145617; 330550, 6145974 (LKS-94)), kur buvo padarytas 1 skrydis (10 pav.).



10 pav. Kartografavimui dronu pasirinktos tyrimų vietos: 1) dirbamas laukas, šalia Kintų žuvininkystės ūkio, prie kelio Kintai – Šilutė, Povilų kaimas, Kintų seniūnija, Šilutės rajonas; 2) dirbamas laukas prie Sakūčių miško, šalia Klumbių siurblynės, Kintų seniūnija, Šilutės rajonas gautų duomenų kokybės užtikrinimui, naudojant droną (koordinacių sistema: LKS-94).

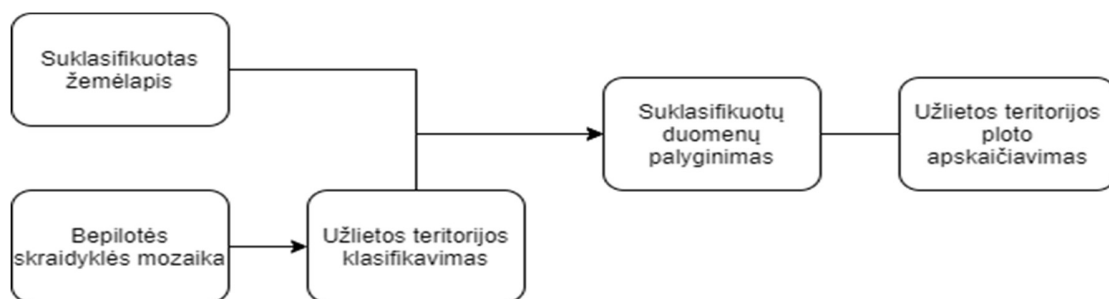
Skrydis dronu vykdomas 90 metrų aukštyje, tokiame aukštyje vieno vaizdo pikselio dydis yra 1,9 cm, taip pat dėl didesnio aukščio galima aprėpti didesnę teritoriją išnaudojant mažiau drono energijos, nes sumažėja skrydžio transektų skaičius. Drono skrydžio metu buvo padaryta nuo 500 iki 1000 nuotraukų, nufotografuotų 90° kampu, kurios buvo sujungtos ir padaryta ortografinė nuotraukų mozaika, naudojant Pix4Dmapper programinę įrangą. Taip pat skirtinguose teritorijos kampuose buvo padaryta keletas nuotraukų 45° kampu, kad geriau išryškėtų užlietos teritorijos dėl esančio Saulės atspindžio kampo. Darant nuotraukas 45° kampu dėl Saulės atspindžio geriau išsiskiria vanduo dėl aukštesnių albedo reikšmių nei sausas laukas (Chadyšienė, 2009). Kadangi kiekviena drono daryta nuotrauka turi geolokaciją, todėl sudarius mozaiką buvo patikrinta, ar ji buvo tiksliai išmatuota. Tai buvo patikrinta su

iš anksto pamatuotais taškais, kurie nekeičia savo lokacijos, tam buvo naudojamas Emlid Reach RS+ imtuvas. Esant drono skrydžio metu netiksliai išmatuoti geolokacijai (paklaida gali siekti iki 5 m), mozaika susiejama su teisingomis koordinatėmis, kurios yra išmatuotos su Emlid Reach RS+ imtuvu.

Kitame drono surinktų duomenų etape ortografinė mozaika buvo klasifikuota į skirtingus sluoksnius: atviras vanduo, nepilnai užlieta augalija, sausuma. Iš suklasifikuotų duomenų buvo pasirinkti SAR duomenų klasifikacijos mokymui reikalingi poligonai, kurie bus naudojami apmokyti atsitiktinio miško klasifikatorių. Mokymui atlikti buvo pasirinkti taškai iš skrydžio, atlikto 2020 m. sausio 9 d., dėl klasifikavimui reikalingų duomenų proporcingo pasiskirstymo tyrimo teritorijoje. SAR duomenų validavimui atlikti buvo naudojamos 3 iš drono vaizdų sudarytos mozaikos: 2019-12-10, 2020-01-09 ir 2020-12-30.

## 2.5. Rezultatų analizės ir validavimo metodai

Metodų validavimo etape naudojama ArcMap 10.5 programa, kuria apskaičiuojami užlietų teritorijų plotai suklasifikuoti iš SAR palydovinių duomenų. Gauti rezultatai sulyginami su realiais duomenimis, t.y., naudojant drono mozaiką. Validuojant SAR palydovinius duomenis apskaičiuojamas kiekvieno metodo (atsitiktinio miško klasifikatoriaus (AMK) ir skirtumų metodo) vidutinis tikslumas trimis drono skrydžio dienomis ir 2 teritorijose: Kintų žuvininkystės tvenkiniuose (2019-12-10 ir 2020-01-09) ir Sakūčių miške (2020-12-30). Kiekvienu atveju išskiriama, kiek SAR palydovinių duomenų apdorojimo metodikos neteisingai suklasifikavo užlietų plotų ir kiek užlietų plotų nesuklasifikavo. Vertinimas atliekamas vizualiniu būdu ir neteisingai suklasifikuotų teritorijų plotas padalinamas iš bendros validavimui pasirinktos teritorijos, metodų tikslumas gaunamas procentine išraiška. Taip pat apskaičiuojamas kiekvienos tyrimo dienos tikslumas abiem metodams (atsitiktinio miško klasifikatoriaus ir skirtumų tarp dviejų laikotarpių) bei bendras vidutinis tikslumas per visas tyrimo dienas (11 pav.).



11 pav. Rezultatų analizės ir validavimo metodika

Prieš atliekant tolimesnę duomenų analizę buvo atrenkami suklasifikuoti Sentinel-1 vaizdai, kuriose teritorijos buvo neįprastai stipriai aplietos, šios teritorijos tikėtina buvo su sniego danga, tokie duomenys buvo pašalinti ir tolimesnei analizei nenaudoti. Tokių vaizdų buvo pašalinta – 47 (21 %).

Užlietų teritorijų klasifikavimo metodų (skirtumų tarp dviejų laikotarpių ir atsitiktinio miško klasifikatoriaus) validavimui buvo naudojami dronų surinkti vaizdai, iš kurių buvo sudarytos mozaikos. Metodų validavimui buvo lyginami duomenys surinkti su dronu ir tos pačios dienos duomenys iš palydovinių duomenų. Šie duomenys buvo validuojami pagal 3 parametrus: neteisingai (per daug užlietos teritorijos sukartografuota), nesuklasifikuota (yra vanduo, tačiau metodas nesuklasifikavo šių teritorijų) bei bendras kiekvieno metodo tikslumas kiekvienu atveju.

## **2.6. Užliejamų teritorijų „karštųjų taškų“ išskyrimas, nuosėdų ir žemėnaudos analizės metodai**

### **2.6.1. „Karštųjų taškų“ analizė**

„Karštieji taškai“ (angl. Hotspots) – dažniausiai užliejamos teritorijos tyrimų laikotarpiu, buvo skaičiuojami visai tyrimo teritorijai Nemuno deltoje. Užliejamų teritorijų „karštųjų taškų“ identifikavimui buvo pasirinktas skirtumų tarp dviejų laikotarpių SAR duomenų apdorojimo metodas, kadangi šie žemėlapiai buvo binariniai: neužlieta teritorija (0) bei užlieta teritorija (1), kas sumažino neteisingos interpretacijos galimybę, kuri galėjo atsirasti naudojant atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodo būdu, sukurtus žemėlapius, kurie turi 3 reikšmes.

„Karštiesiems taškams“ apskaičiuoti buvo naudota rastrų skaičiuoklė (ESRI ArcGIS 10.3), kuri kiekvieno apdoroto vaizdo pikselį sudėjo su kitų vaizdų atitinkamais pikseliais, tokiu būdu buvo gauta kiekvieno pikselio užliejimo kartų suma. „Karštieji taškai“ buvo išreikšti procentais (%) pagal tai, kiek buvo iš viso nuotraukų. Atvejai, kuomet tiriamojoje teritorijoje buvo sniego danga, analizėje nebuvo naudojami. Šie taškai buvo suskirstyti į 6 kategorijas pagal užliejimų dažnį: 0 %, 1-20 %, 21-40 %, 41-60 %, 61-80 %, 81-100 %. Užliejamų teritorijų „Karštieji taškai“ buvo apskaičiuoti kiekvieniems tyrimų metams atskirai ir visam 2015-2019 metų laikotarpiui.

### **2.6.2. Nuosėdų ir žemėnaudos užliejimo analizė**

Dažniausiai užliejamų nuosėdų analizė buvo atliekama, naudojant iš Lietuvos geologijos tarnybos prie Lietuvos ministerijos gautų 2018 m. nuosėdų sluoksnių duomenų. Kadangi nuosėdų iš Rusijos gauti nepavyko, ši analizė buvo atlikta tik Lietuvai priklausančioje Nemuno deltos dalyje, kurios plotas yra 455,4 km<sup>2</sup>. Tiriamoje teritorijoje buvo gauti šie nuosėdų sluoksniai ir jų procentinė dalis

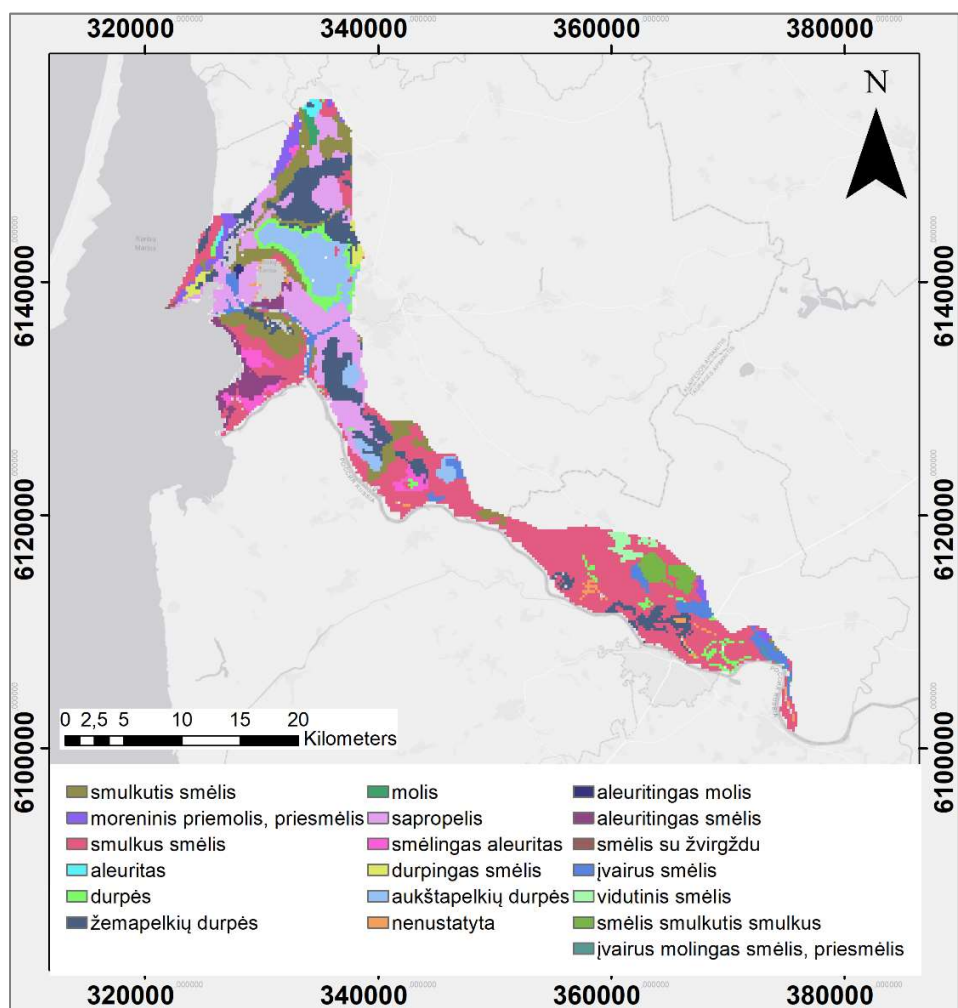
tiriamoje teritorijoje: aleuritas (0,6 %); aleuritingas molis (0,2 %); aleuritingas smėlis (3,8 %); aukštapelkių durpės (4,3 %), durpės (2,6 %); durpingas smėlis (0,5 %); įvairus molingas smėlis, priemolis (0,1 %); įvairus smėlis (3,1 %); molis (0,7 %); moreninis priemolis, priemolis (2,2 %); nenustatyta (1,1 %); sapropelis (16,8 %); smėlis smulkutis smulkus (1,1 %); smėlingas aleuritas (1,8 %); smėlis su žvirgždu (0,02 %); smulkus smėlis (37,5 %); smulkutis smėlis (10,4 %); vidutinis smėlis (0,7 %); žemapelkių durpės (12,5 %) (12 pav.).

Nuosėdų duomenų analizė buvo padaryta visam tiriamajam laikotarpiui ir išskirta pagal užliejimo dažnio kategorijas. Siekiant išvengti neproporcingo skirtumo tarp dažniau ir rečiau pasitaikančių nuosėdų tiriamoje teritorijoje, nuosėdų užliejimo dažnio rezultatai buvo pateikti procentine išraiška, kuri buvo apskaičiuota pagal kiekvieno nuosėdų tipo padengiamo viso tiriamo ploto ir kiekvieno užliejimo dažnio ploto proporciją. siekiant išvengti.

Kadangi skirtingų nuosėdų ir žemėnaudos tipų užimamas plotas tyrimų vietoje kito plačiose ribose, t.y., nuo 0,02 % (smėlio su žvirgždu) iki 37,5 % (smulkaus smėlio), užliejamų nuosėdų dažniui pagal nustatytas užliejamų teritorijų „Karštųjų taškų“ kategorijas (0 %, 1-20 %, 21-40 %, 41-60 %, 61-80 %, 81-100 %) buvo naudojama proporcija (2 lygtis):

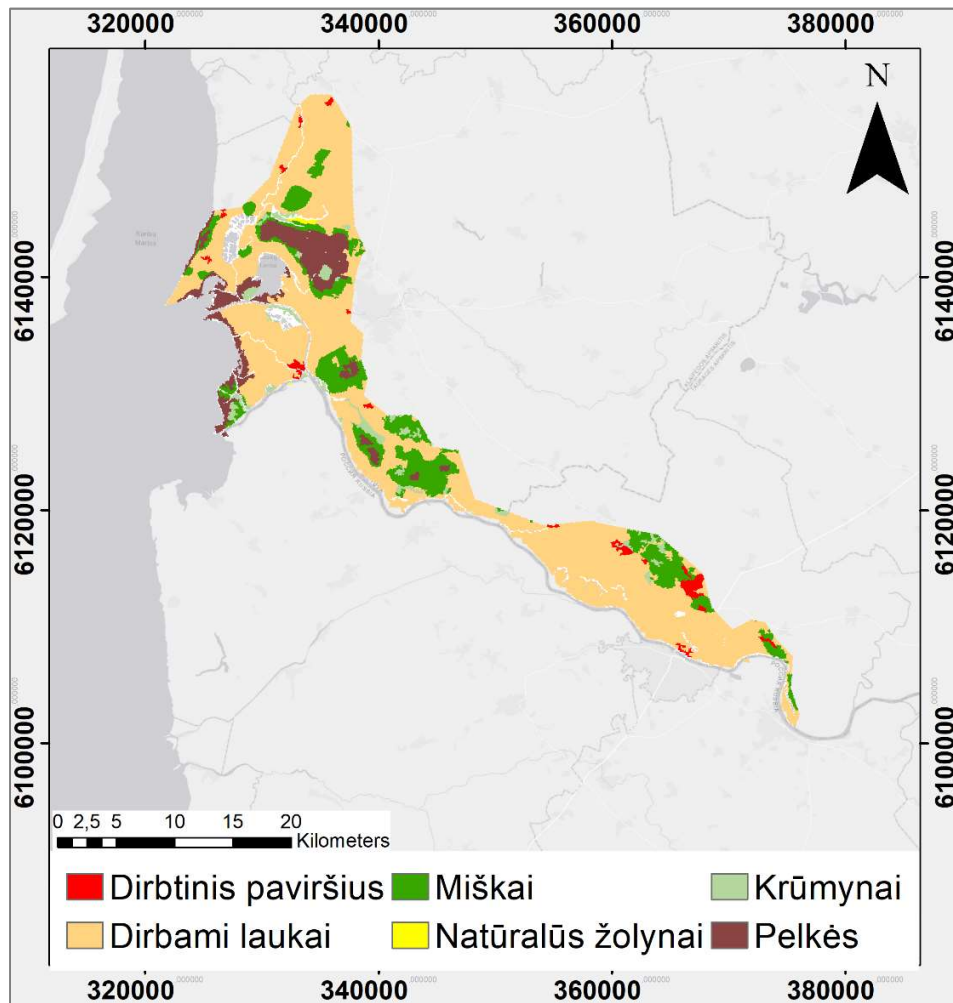
$$P = \frac{S \cdot X_i}{\sum X_i} \quad (2)$$

kur, P – proporcija (%); S - bendras teritorijos plotas (km<sup>2</sup>); X<sub>i</sub> - nuosėdų tipo plotas pagal kategoriją (km<sup>2</sup>).



12 pav. Nuosėdos tyrimo teritorijoje, Lietuvoje.

Užliejamo žemėnaudos tipo dažnumo pagal užliejamų teritorijų „Karštuosius taškus“ analizė buvo atliekama, naudojant CORINE Land Cover — Copernicus Land Monitoring Service gautus žemėnaudos sluoksnius, kurie paskutinį kartą atnaujinti 2020 m. Kadangi Rusijai priklausančios teritorijos žemėnaudos duomenų gauti nepavyko, ši analizė buvo atlikta tik Lietuvai priklausančioje Nemuno deltos dalyje. Tiriamoje teritorijoje buvo gauti šie žemėnaudos sluoksniai: dirbtiniai paviršiai (1,1 %); dirbami laukai (82,9 %); miškai (5,6 %); natūralios pievos (0,2 %); krūmynai (2,2 %); pelkės (8 %). (13 pav.). Kadangi žemėnaudos tipų užimamas plotas tyrimų vietoje kito plačiose ribose, t.y., ir nuo 0,2 % (natūralių pievų) iki 82,9 % (dirbamų laukų), užliejamų žemėnaudos tipų dažniui nustatyti pagal užliejamų teritorijų „Karštųjų taškų“ kategorijas (0 %, 1-20 %, 21-40 %, 41-60 %, 61-80 %, 81-100 %) buvo naudojama 2 lygtis.



13 pav. Žemėnaudos žemėlapis tyrimo teritorijoje, Lietuvoje.

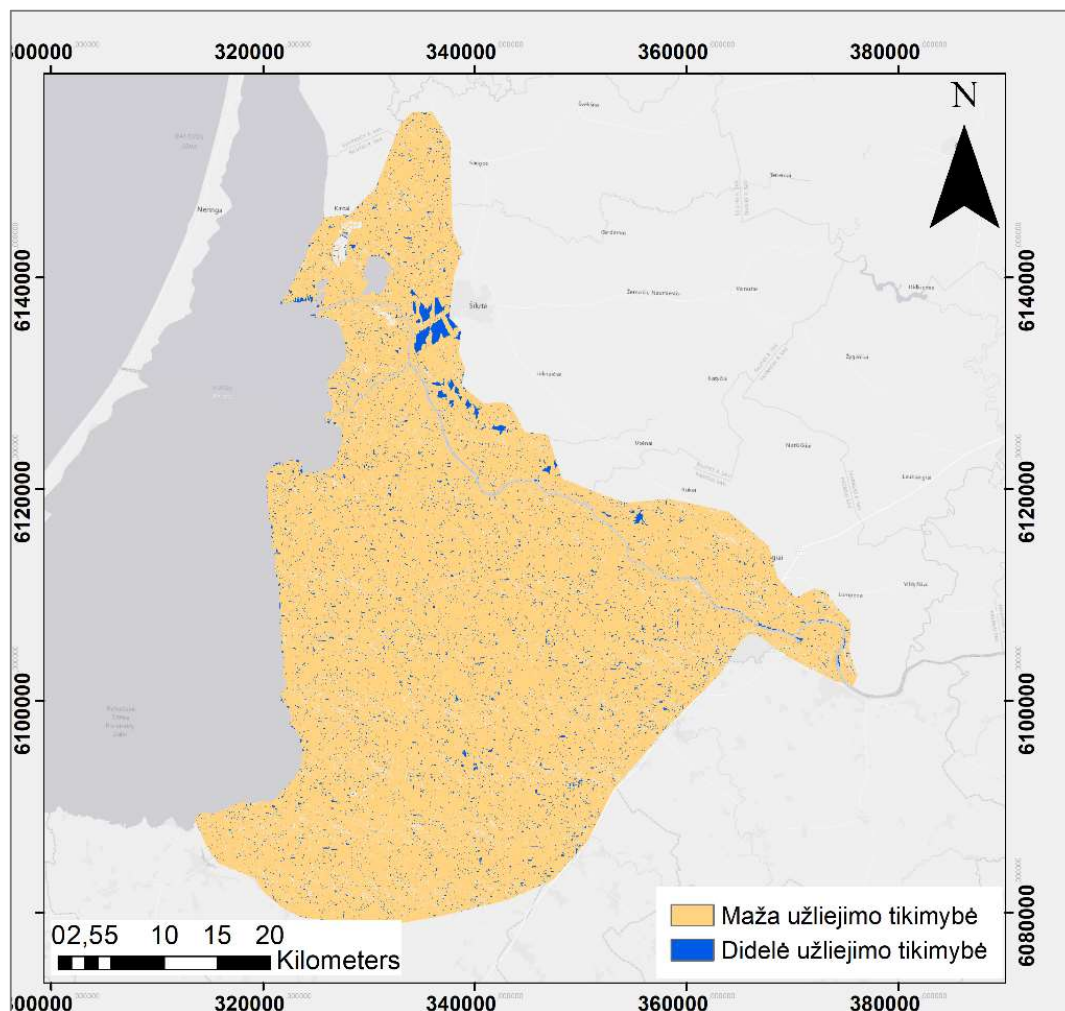
### 2.6.3 Topografinis drėgmės indeksas

Siekiant nustatyti, ar topografija turi reikšmingą poveikį užliejamų teritorijų „karštiesiems taškams“, buvo panaudotas topografinis drėgmės indeksas (angl. *Topographic Wetness Index*). Jo tikslas yra išskirti vietas, kuriose didžiausia tikimybė vandeniui išlikti ilgiau ir kauptis, atsižvelgiant į vietovės reljefo formas (14 pav.).

Šiam indeksui apskaičiuoti reikalinga tiriamos vietovės topografija, kuri buvo gauta iš NASA SRTM duomenų DEM (skaitmeninio aukščio modelio), kurio rezoliucija siekia 10 metrų. Topografiniam drėgmės indeksui apskaičiuoti kiekviename tiriamos teritorijos pikselyje reikia pirmiausiai sukurti keletą sluoksnių: iš DEM apskaičiuojama tiriamos teritorijos vandens tėkmės kryptis ir kiekvienam pikseliui priskiriama vektorinė vertė. Tėkmės krypties vektoriai naudojami siekiant gauti akumuliacijos indeksą

(angl. *accumulation index*), iš DEM paskaičiuojamas kiekvieno vaizdo pikselio šlaito dydis laipsniais. Topografinis drėgmės indeksas gaunamas naudojant šią lygtį:

$$TDI = Ln \frac{\text{akumuliacijos indeksas}}{\tan(\text{šlaito statumas})}$$



14 pav. Topografinis užliejimo indeksas tyrimo teritorijoje su užliejimo tikimybe.

## 2.7. Statistinė duomenų analizė

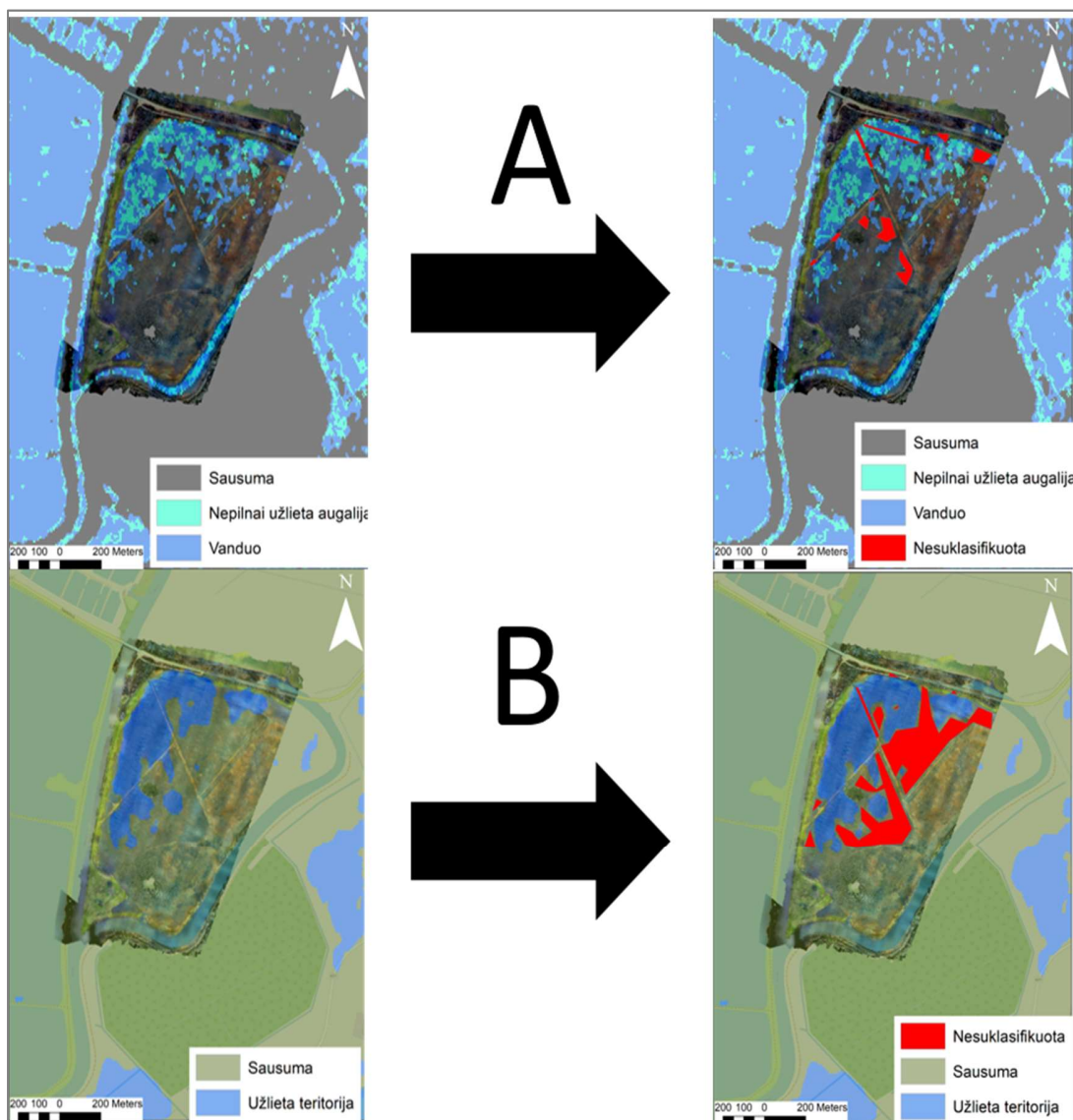
Šiame darbe buvo naudojamos aprašomosios statistikos (vidurkis, standartinis nuokrypis), kurie buvo naudojami aprašyti užliejamų teritorijų plotus, naudojant R programinę įrangą. Patikrinti užlietų teritorijų duomenų normališkumą buvo sudarytas kvantilinis grafikas (angl. Normal Q-Q Plot) bei atliktas Levene testas (Zuur et al., 2007). Kadangi duomenys neatitinka normalumo prielaidos dėlto buvo naudojamas neparametrinis Kruskal-Wallis testas, kuris parodė, kad yra skirtumai tarp metų, šių

duomenų analizei buvo panaudota neparametrinė daugkartinio lyginimo analizė, naudojant Dunno testą, su tikslu ištirti užliejamų plotų skirtumus tarp tyrimo laikotarpių. Atlikti Dunno testą buvo naudotas „FSA“ paketas R programinėje įrangoje (R Development Core Team, 2020). Histogramos su pasikliautinių intervalų grafiniu vaizdu buvo padarytos abiem metodams (AMK ir skirtumų), kurių tikslas vizualiai parodyti skirtumus tarp skirtingų metų duomenų abejų metodu atveju. Šios diagramos buvo paruoštos, naudojant R programinę įrangą. Palyginti debitų ir kritulių duomenims su užlietų teritorijų plotais buvo atlikta linijinė regresija, naudojant R programinę įrangą. Erdvinei duomenų statistikai („karštųjų taškų“ plotams, topografiniam drėgmės indeksui) apskaičiuoti buvo naudotas „Raster calculator“ įrankis, QGIS 3.16 programinėje įrangoje.

### III. REZULTATAI

#### 3.1. Metodų validavimas

Abiejose validavimui skirtose teritorijose, validavimo tikslumo užtikrinimui skirtas plotas užėmė 0,5 km<sup>2</sup> teritoriją (15 pav.). Palydovinių duomenų validacija panaudojant dronu surinktus duomenimis parodė, kad atsitiktinio miško metodas (AMK) yra tikslesnis (tikslumas siekė 92,92 ± 2,18 %), nei skirtumų metodas (tikslumas siekė 84,71 ± 11,18 %). Daugiausiai abu metodai neatpažino užlietų teritorijų (AMK = 6,36 ± 2,65 %, skirtumų metodas = 14,04 ± 11,24 %). Neteisingai suklasifikuota, kai metodas rodė vandenį, bet tiriamu laiku toje vietoje jo nebuvo, AMK metodu buvo 0,71 ± 0,73 % viso ploto, o skirtumų metodu 1,25 ± 1,12 %. AMK metodo tikslumas Kintų žuvininkystės tvenkiniuose 2019-12-10 siekė 90,41 %, Kintų žuvininkystės tvenkiniuose 2020-01-09 siekė 94,37 %, Sakūčių miške 2020-12-30 siekė 93,98 %. Skirtumų metodo tikslumas Kintų žuvininkystės tvenkiniuose 2020-01-09 siekė 94,55 %, Kintų žuvininkystės tvenkiniuose 2019-12-10 siekė 72,55 % ir Sakūčių miške 2020-12-30 siekė 87,02 % (2 lentelė). Užlietų teritorijų validavimo rezultatai statistiškai reikšmingai nesiskyrė tyrimų laikotarpiu (t testas, t = 1,2, p = 0,3, N = 3).



15 pav. Duomenų validavimas, naudojant 2020-01-09 drono ortomozaiką ir suklasifikuotus Sentinel-1 vaizdus, Kintuose (pavaizduota), skirtingais metodais (A) atsitiktinio miško klasifikavimo metodu ir (B) skirtumų tarp dviejų laikotarpių metodu.

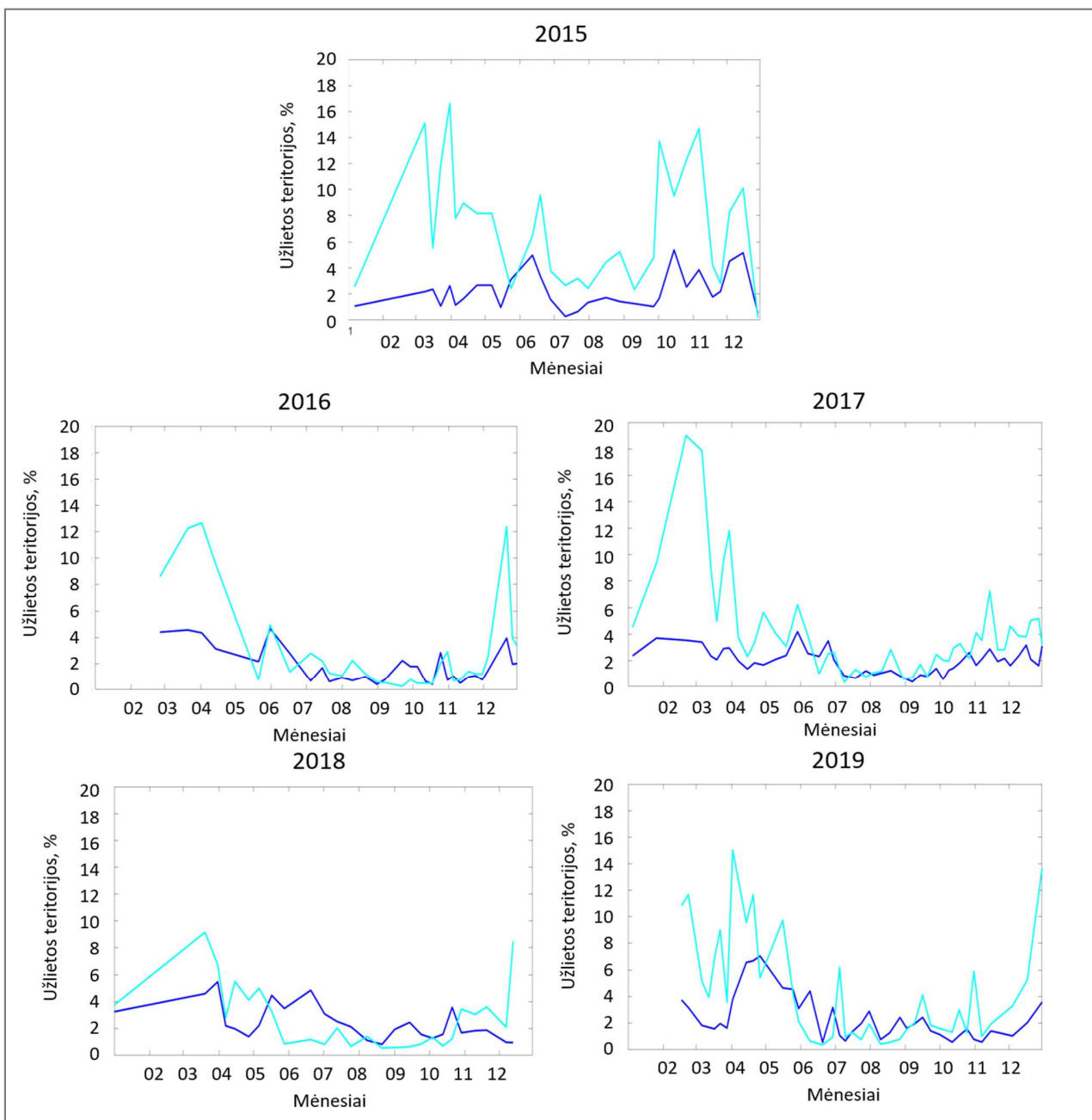
2 lentelė. Atsitiktinio miško klasifikatoriaus (AMK) ir skirtumų metodo validavimas, naudojant drono skrydžio mozaikas iš 2 tyrimo teritorijų (Kintų žuvininkystės tvenkinių ir Sakūčių miško). Vidutinis tikslumas ( $\pm$  standartinis nuokrypis) kiekvieno metodo.

	<b>Kintų tvenkiniai (0,5 km<sup>2</sup>)</b>			
	<b>2019-12-10</b>		<b>2020-01-09</b>	
	<b>AMK metodas</b>	<b>Skirtumų metodas</b>	<b>AMK metodas</b>	<b>Skirtumų metodas</b>
<b>Neteisingai suklasifikuota</b>	0,32 %	0,42 %	1,56 %	0,81 %
<b>Nesuklasifikuota</b>	9,26 %	5,03 %	4,07 %	26,64 %
<b>Tiksliai suklasifikuota</b>	90,41 %	94,55 %	94,37 %	72,55 %
	<b>Sakūčių miškas (0,5 km<sup>2</sup>)</b>		<b>Vidutinis tikslumas</b>	
	<b>2020-12-30</b>			
	<b>AMK metodas</b>	<b>Skirtumų metodas</b>	<b>AMK metodas</b>	<b>Skirtumų metodas</b>
<b>Neteisingai suklasifikuota</b>	0,26 %	2,53 %	0,71 $\pm$ 0,73 %	1,25 $\pm$ 1,12 %
<b>Nesuklasifikuota</b>	5,76 %	10,45 %	6,36 $\pm$ 2,65 %	14,04 $\pm$ 11,24 %
<b>Tiksliai suklasifikuota</b>	93,98 %	87,02 %	92,92 $\pm$ 2,18 %	84,71 $\pm$ 11,18 %

### 3.2. Užlietų teritorijų pasiskirstymo dėsningumai Nemuno deltoje

#### 3.2.2. Užlietų teritorijų erdvinis pasiskirstymas pagal atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodą

Naudojant atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodą didžiausias užlietų teritorijų plotas buvo nustatytas 2019 m. balandžio 21 – balandžio 27 d. (9,6 %), o mažiausias plotas buvo 2015 m. birželio 29 – liepos 12 d. (0,03 %). Didžiausias užlietos teritorijos su nepilnai užlieta augalija plotas buvo 2017 m. vasario 11 – vasario 21 d. (19 %). Mažiausias užlietas plotas buvo 2015 m. gruodžio 24 – gruodžio 29 d. (0,2 %) (16 pav.).



16 pav. Vidutinis užlietų teritorijų plotas 2015-2019 m. laikotarpiu (procentinė dalis nuo bendro tiriamos teritorijos ploto (2014,1 km<sup>2</sup>) panaudojant atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodą. Tamsi mėlyna – pilnai užlieta teritorija, šviesiai mėlyna – nepilnai užlietos augalijos plotai.

2015 m. pirmojo ketvirčio (sausio-kovo) vidutinis pilnai užlietos teritorijos plotas sudarė  $1,8 \pm 0,01$  % bendro tyrimo teritorijos ploto. Šio laikotarpio vidutinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas sudarė  $10,4 \pm 0,06$  % bendro tyrimo teritorijos ploto, taip pat šiuo laikotarpiu buvo pasiektas ir didžiausias 2015 m. momentinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas

(16,6 %) (N=5). 2015 m. antrojo ketvirčio (balandžio – birželio) vidutinis pilnai užlietos teritorijos plotas buvo  $2,4 \pm 0,01$  % bendros teritorijos taip pat šiuo laikotarpiu buvo užfiksuotas didžiausias momentinis pilnai užlietos teritorijos plotas (5 %). Šio laikotarpio vidutinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas sudarė  $6,8 \pm 0,02$  % bendro tyrimo teritorijos ploto (N=10). 2015 m. trečiasis ketvirtis (liepa – rugsėjis) buvo su mažiausiu teritorijos užliejimu 2015 m. laikotarpiu, kurio vidutinis pilnai užlietos teritorijos plotas sudarė  $1,1 \pm 0,01$  % bendro teritorijos ploto. Šio laikotarpio vidutinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija taip pat buvo mažiausias 2015 m. laikotarpiu, kurio plotas sudarė  $3,6 \pm 0,01$  % bendro tyrimo teritorijos ploto (N=7), šiame ketvirtyje taip pat buvo užfiksuotas mažiausias 2015 m. momentinis pilno užliejimo plotas (0,9 %) bei mažiausias momentinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas (2,3 %). 2015 m. ketvirto ketvirčio (spalio-gruodžio) pilnai užlietos teritorijos ploto vidurkis siekė  $2,6 \pm 0,02$  %, o vidutinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas sudarė  $7,6 \pm 0,1$  % (N=9).

2016 m. pirmojo ketvirčio (sausio-kovo) vidutinis pilnai užlietos teritorijos plotas sudarė  $3,1 \pm 0,02$  % bendro tyrimo teritorijos ploto. Šio laikotarpio vidutinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas sudarė  $10,6 \pm 0,03$  % bendro tyrimo teritorijos ploto (N=2). 2016 m. antrojo ketvirčio (balandžio - birželio) vidutinis pilnai užlietos teritorijos plotas buvo  $3,5 \pm 0,01$  % bendros teritorijos taip pat šiuo laikotarpiu buvo užfiksuotas didžiausias momentinis 2016 m. pilnai užlietos teritorijos plotas (4,7 %). Šio laikotarpio vidutinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas sudarė  $4,08 \pm 0,04$  % bendro tyrimo teritorijos ploto (N=6). 2016 m. trečiasis ketvirtis (liepa – rugsėjis) buvo su mažiausiu teritorijos užliejimu 2016 m. laikotarpiu, kurio vidutinis pilnai užlietos teritorijos plotas sudarė  $1,1 \pm 0,01$  % bendro teritorijos ploto. Šio laikotarpio vidutinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija taip pat buvo mažiausias 2016 m. laikotarpiu, kurio plotas sudarė  $1,3 \pm 0,01$  % bendro tyrimo teritorijos ploto (N=9), šiame ketvirtyje taip pat buvo užfiksuotas mažiausias 2015 m. momentinis pilno užliejimo plotas (0,4 %) bei mažiausias momentinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas (0,3 %). 2016 m. ketvirto ketvirčio (spalio-gruodžio) pilnai užlietos teritorijos ploto vidurkis siekė  $1,4 \pm 0,01$  %, o vidutinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas sudarė  $2,1 \pm 0,02$  % (N=14).

2017 m. pirmojo ketvirčio (sausio-kovo) vidutinis pilnai užlietos teritorijos plotas sudarė  $3,2 \pm 0,01$  % bendro tyrimo teritorijos ploto. Šio laikotarpio vidutinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas sudarė  $10,9 \pm 0,06$  % bendro tyrimo teritorijos ploto, taip pat buvo užfiksuotas didžiausias momentinis 2017 m. užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas, siekęs 19,4 % bendros teritorijos ploto (N=8). 2017 m. antrojo ketvirčio (balandžio - birželio) vidutinis pilnai užlietos teritorijos

plotas buvo  $2,3 \pm 0,01$  % bendros teritorijos taip pat šiuo laikotarpiu buvo užfiksuotas didžiausias momentinis 2017 m. pilnai užlietos teritorijos plotas (4,2 %). Šio laikotarpio vidutinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas sudarė  $3,5 \pm 0,02$  % bendro tyrimo teritorijos ploto (N=10). 2017 m. trečiasis ketvirtis (liepa – rugsėjis) buvo su mažiausiu teritorijos užliejimu 2017 m. laikotarpiu, kurio vidutinis pilnai užlietos teritorijos plotas sudarė  $0,9 \pm 0,003$  % bendro teritorijos ploto. Šio laikotarpio vidutinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija taip pat buvo mažiausias 2017 m. laikotarpiu, kurio plotas sudarė  $1,2 \pm 0,01$  % bendro tyrimo teritorijos ploto (N=13), šiame ketvirtyje taip pat buvo užfiksuotas mažiausias 2017 m. momentinis pilno užliejimo plotas (0,4 %) bei mažiausias momentinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas (0,3 %). 2017 m. ketvirto ketvirčio (spalio-gruodžio) pilnai užlietos teritorijos ploto vidurkis siekė  $2,01 \pm 0,01$  %, o vidutinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas sudarė  $3,7 \pm 0,01$  % (N=15).

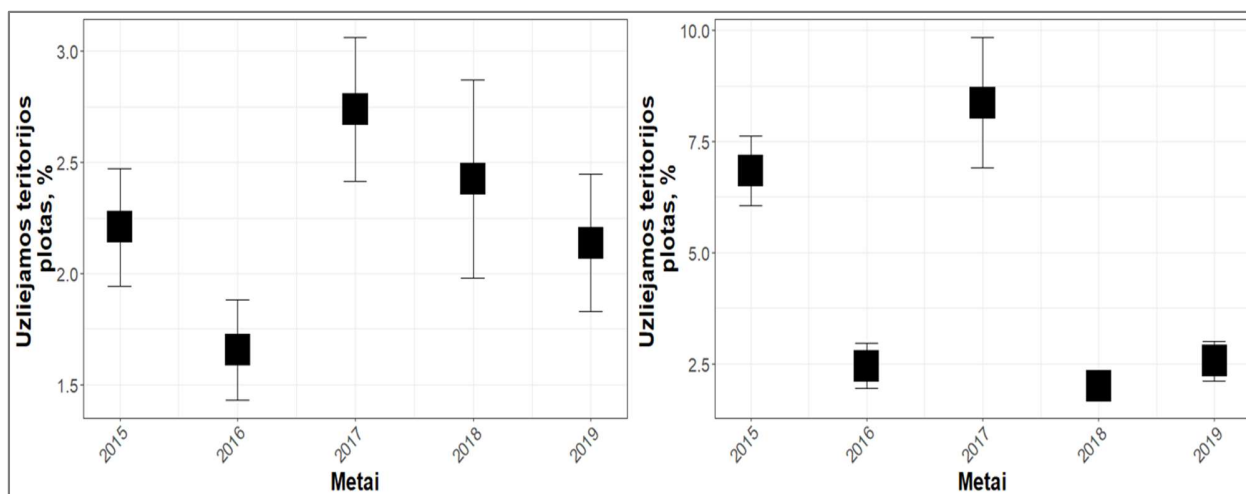
2018 m. pirmojo ketvirčio (sausio-kovo) vidutinis pilnai užlietos teritorijos plotas sudarė  $4,4 \pm 0,01$  % bendro tyrimo teritorijos ploto. Šio laikotarpio vidutinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas sudarė  $9,5 \pm 0,06$  % bendro tyrimo teritorijos ploto, taip pat buvo užfiksuotas didžiausias momentinis 2018 m. pilnai užlietų teritorijų plotas, siekęs 5,5 % bendros teritorijos ploto ir 2018 m. didžiausias užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas, siekęs 9,2 % bendros teritorijos ploto, šiuo laikotarpiu aštuoni periodai buvo su sniego danga ir buvo neįskaičiuoti (N=4). 2018 m. antrojo ketvirčio (balandžio - birželio) vidutinis pilnai užlietos teritorijos plotas buvo  $2,9 \pm 0,01$  % bendros teritorijos. Šio laikotarpio vidutinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas sudarė  $3,6 \pm 0,02$  % bendro tyrimo teritorijos ploto (N=6). 2018 m. trečiasis ketvirtis (liepa – rugsėjis) buvo su mažiausiu teritorijos užliejimu 2018 m. laikotarpiu, kurio vidutinis pilnai užlietos teritorijos plotas sudarė  $2,8 \pm 0,02$  % bendro teritorijos ploto. Šio laikotarpio vidutinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija taip pat buvo mažiausias 2018 m. laikotarpiu, kurio plotas sudarė  $1,1 \pm 0,01$  % bendro tyrimo teritorijos ploto (N=10), šiame ketvirtyje taip pat buvo užfiksuotas mažiausias 2018 m. momentinis pilno užliejimo plotas (0,8 %) bei mažiausias momentinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas (0,5 %). 2018 m. ketvirto ketvirčio (spalio-gruodžio) pilnai užlietos teritorijos ploto vidurkis siekė  $2,8 \pm 0,02$  %, o vidutinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas sudarė  $3 \pm 0,02$  % (N=9).

2019 m. pirmojo ketvirčio (sausio-kovo) vidutinis pilnai užlietos teritorijos plotas sudarė  $3,3 \pm 0,003$  % bendro tyrimo teritorijos ploto. Šio laikotarpio vidutinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas sudarė  $11,3 \pm 0,2$  % bendro tyrimo teritorijos ploto (N=3). 2019 m. antrojo ketvirčio (balandžio - birželio) vidutinis pilnai užlietos teritorijos plotas buvo  $4,1 \pm 0,02$  % bendros teritorijos taip

pat šiuo laikotarpiu buvo užfiksuotas didžiausias momentinis 2019 m. pilnai užlietos teritorijos plotas (6,7 %). Šio laikotarpio vidutinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas sudarė  $6,2 \pm 0,02$  % bendro tyrimo teritorijos ploto (N=18). 2019 m. trečiasis ketvirtis (liepa – rugsėjis) buvo su mažiausiu teritorijos užliejimu 2019 m. laikotarpiu, kurio vidutinis pilnai užlietos teritorijos plotas sudarė  $1,9 \pm 0,01$  % bendro teritorijos ploto. Šio laikotarpio vidutinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija taip pat buvo mažiausias 2019 m. laikotarpiu, kurio plotas sudarė  $1,6 \pm 0,02$  % bendro tyrimo teritorijos ploto (N=14), šiame ketvirtyje taip pat buvo užfiksuotas mažiausias 2019 m. momentinis pilno užliejimo plotas (0,5 %) bei mažiausias momentinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas (0,4 %). 2019 m. ketvirto ketvirčio (spalio-gruodžio) pilnai užlietos teritorijos ploto vidurkis siekė  $1,2 \pm 0,01$  %, o vidutinis užlietos teritorijos su į paviršių išnirusia augalija plotas sudarė  $3,9 \pm 0,02$  % (N=10).

Naudojant atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodą, didžiausias vidutinis pilnai užlietos teritorijos metų vidurkis pagal atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodą buvo 2017 ( $2,7 \pm 2,2$  %) metais. Mažiausias vidutinis pilnai užlietos teritorijos metų vidurkis pagal atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodą buvo 2016 metais ( $1,7 \pm 1,2$  %).

Pilnai užlietų teritorijų plotas statistiškai reikšmingai skyrėsi tyrimų laikotarpiu (Kruskal-Wallis testas,  $H=10,8$   $p<0,05$ ). 2017 metų užliejamų teritorijų vidutinis plotas ( $2,7 \pm 2,2$  %) statistiškai reikšmingai skyrėsi nuo 2016 ( $1,7 \pm 1,2$  %) metų (Dunno testas,  $p<0,05$ ) (17 pav.).



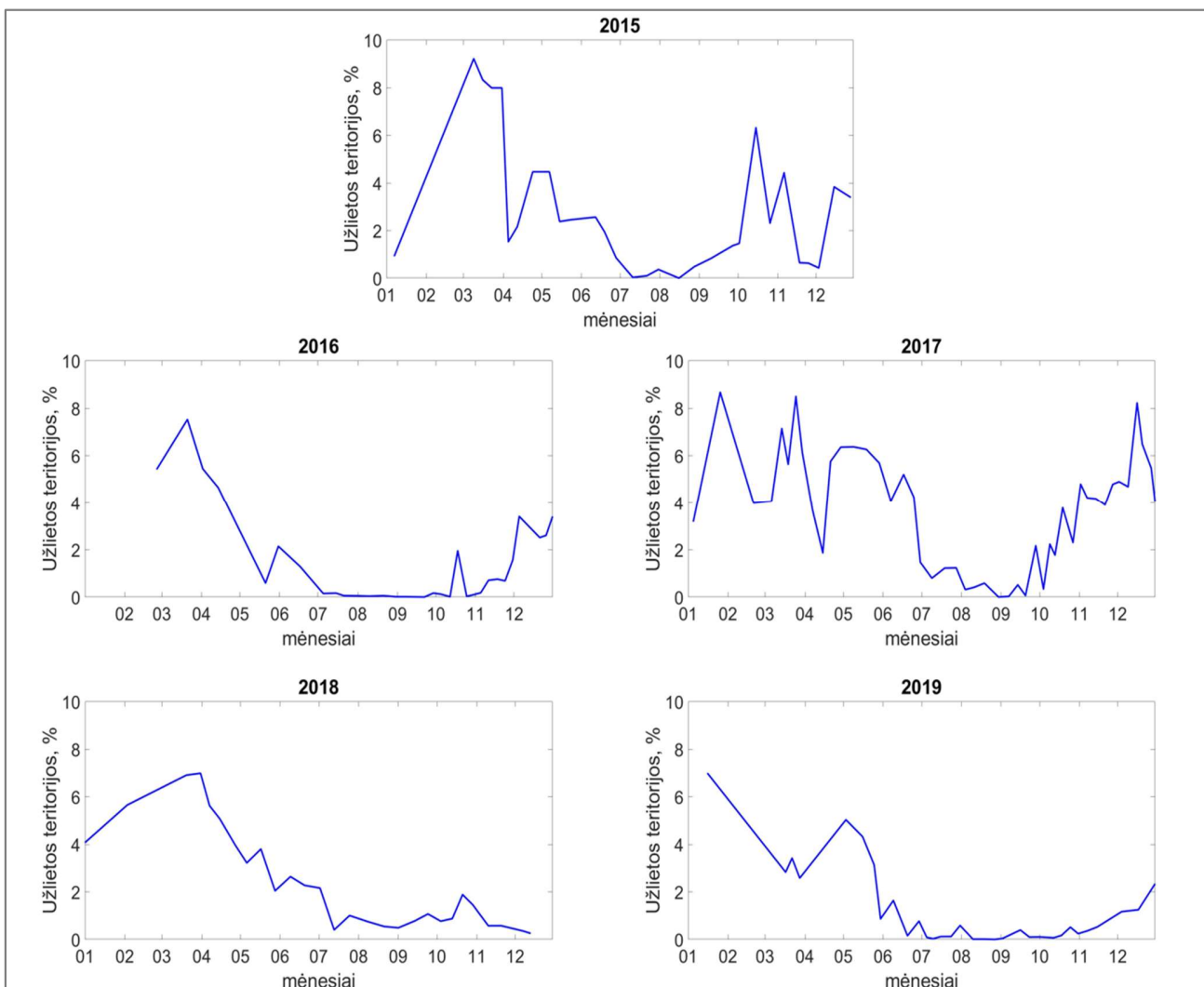
17 pav. Vidutinis metinis užliejamų teritorijų plotas (procentinė dalis nuo bendro tiriamosios teritorijos ploto, (2014,1 km<sup>2</sup>)) 2015-2019 metų laikotarpiu a) pilnai užlietos teritorijos, b) nepilnai užlietos augalijos plotai, panaudojant atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodą (Užliejamos teritorijos ploto ašys apima skirtingas maksimumo ribas).

Didžiausias vidutinis užlietos teritorijos su nepilnai užlieta augalija metų vidurkis pagal atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodą buvo 2017 ( $8,4 \pm 10,2$  %) metais. Mažiausias vidutinis pilnai užlietos teritorijos metų vidurkis pagal atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodą buvo 2018 metais ( $2 \pm 1,2$  %).

Užlietų teritorijų su nepilnai užlieta augalija teritorijų plotas statistiškai reikšmingai skyrėsi tyrimų laikotarpiu (Kruskal-Wallis testas,  $H=45,8$   $p<0,05$ ). 2015 metų užliejamų teritorijų vidutinis plotas ( $6,8 \pm 4,2$  %) statistiškai reikšmingai skyrėsi nuo 2016 ( $2,5 \pm 2,7$  %), 2018 ( $2 \pm 1,2$  %) ir 2019 ( $2,56 \pm 2,43$  %) metų. 2016 metų užliejamų teritorijų vidutinis plotas ( $2,45 \pm 2,73$  %) statistiškai reikšmingai skyrėsi nuo 2017 ( $8,4 \pm 10,2$  %) metų. 2017 metų užliejamų teritorijų vidutinis plotas ( $8,4 \pm 10,2$  %) statistiškai reikšmingai skyrėsi nuo 2018 ( $2 \pm 1,2$  %) ir 2019 ( $2,6 \pm 2,4$  %) metų (Dunno testas,  $p<0,05$ ).

### **3.2.1. Užlietų teritorijų erdvinis pasiskirstymas pagal skirtumų metodą**

2015-2019 m. laikotarpiu didžiausias užliejimo plotas buvo 2015 m. kovo 2 –10 d., kuris siekė 9,2 % užlietos teritorijos nuo bendro ploto (2014,1 km<sup>2</sup>). Taip pat išsiskyrė 2017 m. sausio 20 –26 d. laikotarpis, kurio metu užlietos teritorijos sudarė 8,7 % nuo bendro tiriamos teritorijos ploto. 2015-2019 m. laikotarpiu buvo keletas laikotarpių, kada tiriamoje teritorijoje užlietų teritorijų nebuvo aptikta: 2016 m. rugsėjo 7 –22 d., 2017 m. rugpjūčio 20 –31 d. ir 2019 m. rugpjūčio 19 –28 d. (18 pav.).



18 pav. Vidutinis užlietų teritorijų plotas 2015-2019 m. laikotarpiu (procentinė dalis nuo bendro tiriamos teritorijos ploto (2014,1 km<sup>2</sup>), naudojant skirtumų metodą.

2015 m. pirmojo ketvirčio (sausio-kovo mėn.) vidutinis užlietos teritorijos plotas sudarė  $5,3 \pm 0,04$  % bendro tyrimo teritorijos ploto, taip pat buvo užfiksuotas didžiausias 2015 m. užlietos teritorijos plotas (9,2 %) (N=5). 2015 m. antrojo ketvirčio (balandžio - birželio) vidutinis užliejamos teritorijos plotas buvo  $3,1 \pm 0,02$  % bendros teritorijos (N=10). 2015 m. trečiasis ketvirtis (liepa – rugsėjis) buvo nustatytas mažiausias užlietos teritorijos plotas, kurio vidurkis buvo  $0,45 \pm 0,01$  % bendro teritorijos ploto (N=7), šiame ketvirtyje taip pat buvo užfiksuotas mažiausias 2015 m. momentinis užliejimo plotas (0,001 %). 2015 m. ketvirto ketvirčio (spalio-gruodžio) vidurkis siekė  $2,6 \pm 0,02$  % (N=9).

2016 m. pirmojo ketvirčio (sausio-kovo mėn.) vidutinis užlietos teritorijos plotas sudarė  $4,83 \pm 0,03$  % bendro tyrimo teritorijos ploto (N=2). Buvo užfiksuotas didžiausias 2016 m. užlietos teritorijos plotas, kuris siekė 5,4 % bendros teritorijos ploto. 2016 m. antrojo ketvirčio (balandžio-birželio)

vidutinis užlietos teritorijos plotas sudarė  $2,4 \pm 0,02$  % bendros teritorijos (N=6). 2016 m. trečiasis ketvirtis (liepa – rugsėjis) buvo su mažiausiu teritorijos užliejimu 2016 m. laikotarpiu, kurio vidutinis užlietos teritorijos plotas sudarė  $0,1 \pm 0,0006$  % bendro teritorijos ploto (N=9), šiame ketvirtyje taip pat buvo užfiksuotas 15 dienų periodas be užlietų teritorijų. 2016 m. ketvirto ketvirčio (spalio-gruodžio) vidurkis siekė  $1,3 \pm 0,01$  % (N=14).

2017 m. pirmojo ketvirčio (sausio-kovo) vidutinis užlietos teritorijos plotas sudarė  $5,9 \pm 0,02$  % (N=8) bendro tyrimo teritorijos ploto, taip pat buvo užfiksuotas didžiausias momentinis 2017 m. užlietos teritorijos plotas, siekęs 8,67 % bendros teritorijos ploto. 2017 m. antrojo ketvirčio (balandžio-birželio) vidutinis užlietos teritorijos plotas sudarė  $4,9 \pm 0,01$  % bendros teritorijos (N=10). 2017 m. trečiajame ketvirtyje (liepa – rugsėjis) buvos nustatytas mažiausias užliejamos teritorijos plotas,  $0,1 \pm 0,007$  % bendro teritorijos ploto (N=13), šiame ketvirtyje taip pat buvo užfiksuotas 11 dienų periodas be užlietų teritorijų. 2017 m. ketvirto ketvirčio (spalio-gruodžio) vidurkis siekė  $4,1 \pm 0,02$  % (N=15).

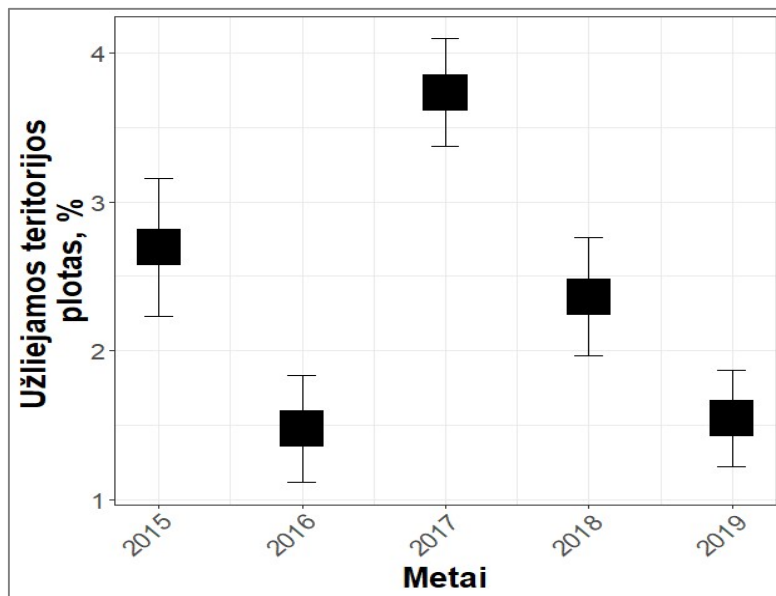
2018 m. pirmojo ketvirčio (sausio-kovo) vidutinis užlietos teritorijos plotas sudarė  $5,9 \pm 0,01$  % (N=4) bendro tyrimo teritorijos ploto, taip pat buvo užfiksuotas didžiausias 2018 m. užlietos teritorijos plotas, siekęs 6,98 % bendros teritorijos ploto. 2018 m. antrojo ketvirčio (balandžio-birželio) vidutinis užlietos teritorijos plotas sudarė  $3,6 \pm 0,01$  % bendros teritorijos (N=8). 2018 m. trečiuoju ketvirčiu (liepa – rugsėjis) vidutinis užlietos teritorijos plotas sudarė  $0,9 \pm 0,006$  % bendro teritorijos ploto (N=8), šiame ketvirtyje taip pat buvo užfiksuotas mažiausias 2015 m. užliejimo plotas (0,4 %). 2018 m. ketvirtas ketvirtis (spalis-gruodis) buvo su mažiausiu teritorijos užliejimu 2018 m. laikotarpiu, kurio vidurkis siekė  $0,8 \pm 0,006$  % (N=7).

2019 m. pirmojo ketvirčio (sausio-kovo) vidutinis užlietos teritorijos plotas sudarė  $3,7 \pm 0,02$  % (N=8) bendro tyrimo teritorijos ploto, taip pat buvo užfiksuotas didžiausias 2019 m. užlietos teritorijos plotas, siekęs 7 % bendros teritorijos ploto. 2019 m. antrojo ketvirčio (balandžio-birželio) vidutinis užlietos teritorijos plotas sudarė  $2,3 \pm 0,02$  % bendros teritorijos (N=7), šiuo laikotarpiu šeši periodai buvo su sniego danga ir buvo neįskaičiuoti. 2019 m. trečiasis ketvirtis (liepa – rugsėjis) buvo su mažiausiu teritorijos užliejimu 2019 m. laikotarpiu, kurio vidutinis užlietos teritorijos plotas sudarė  $0,1 \pm 0,002$  % bendro teritorijos ploto (N=13), šiame ketvirtyje taip pat buvo užfiksuotas 9 dienų periodas be užlietų teritorijų. 2019 m. ketvirto ketvirčio (spalio-gruodžio) vidurkis siekė  $0,8 \pm 0,01$  % (N=10), šiuo laikotarpiu trys periodai buvo su sniego danga ir buvo neįskaičiuoti.

2015-2019 m. laikotarpiu, naudojant skirtumų metodą didžiausias vidutinis metinis užliejamų teritorijos dydis buvo 2017 m. ( $3,7 \pm 2,5$  %), o mažiausias vidutinis metinis užliejamos teritorijos dydis buvo 2016 metais ( $1,5 \pm 2$  %). 2019 m. bendras vidutinis metinis užlietos teritorijos dydis nebuvo didelis

( $2,7 \pm 2,6$  %). Vidutinis metinis užlietos teritorijos dydis 2015 ( $2,7 \pm 2,6$  %) ir 2018 metais ( $2,4 \pm 1,6$  %) atitinkamai buvo antras ir trečias didžiausias 2015-2019 m. laikotarpyje.

Užliejamų teritorijų plotas statistiškai reikšmingai skyrėsi tyrimų laikotarpiu (Kruskal-Wallis testas,  $H=27,7$ ,  $p<0,05$ ). 2017 m. užliejamų teritorijų vidutinis plotas ( $3,7 \pm 2,5$  %) statistiškai reikšmingai skyrėsi nuo 2016 ( $1,5 \pm 2$  %) ir 2019 ( $2,7 \pm 2,6$  %) m. (Dunno testas,  $p<0,05$ ) (19 pav.).

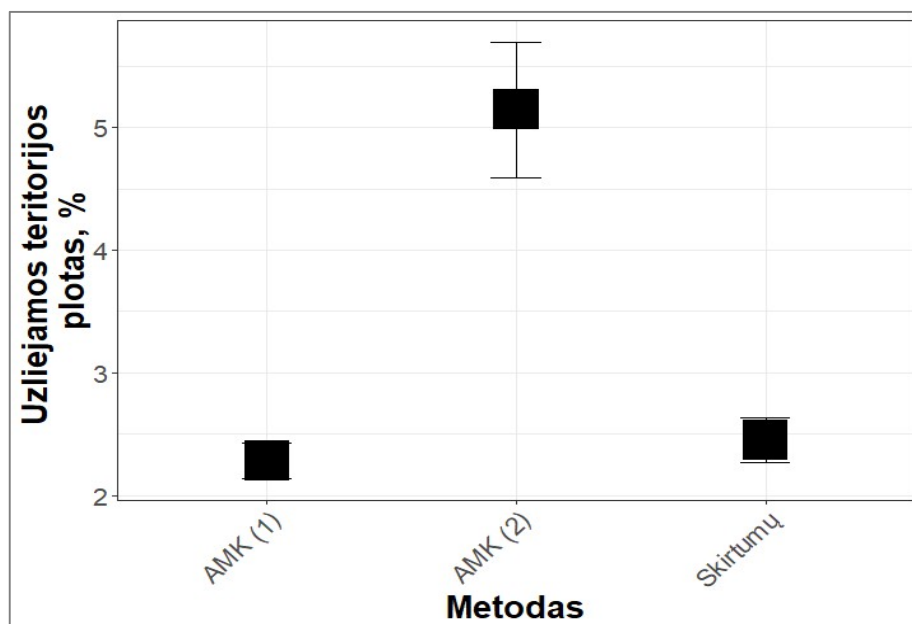


19 pav. Vidutinis metinis užliejamų teritorijų plotas (procentinė dalis nuo bendro tiriamosios teritorijos ploto ( $2014,1 \text{ km}^2$ ) 2015-2019 metų laikotarpiu, panaudojant skirtumų metodą.

2015-2019 metų laikotarpiu, lyginant užliejamos teritorijos dydį tarp metodų didžiausias užliejamos teritorijos plotas buvo naudojant atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodą, kuriuo buvo tikrinami nepilnai užlietos augalijos plotai, kurių užlieta buvo ( $5,1 \pm 6,8$  %). Mažiausias užliejamos teritorijos plotas buvo naudojant atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodą, kuriuo buvo tikrinama pilnai užlietos teritorijos ( $2,3 \pm 1,8$  %). Naudojant skirtumų metodą, pilnai užlietos teritorijos klasifikavimui buvo gautas ( $2,5 \pm 2,4$  %) užlietos teritorijos vidutinis plotas.

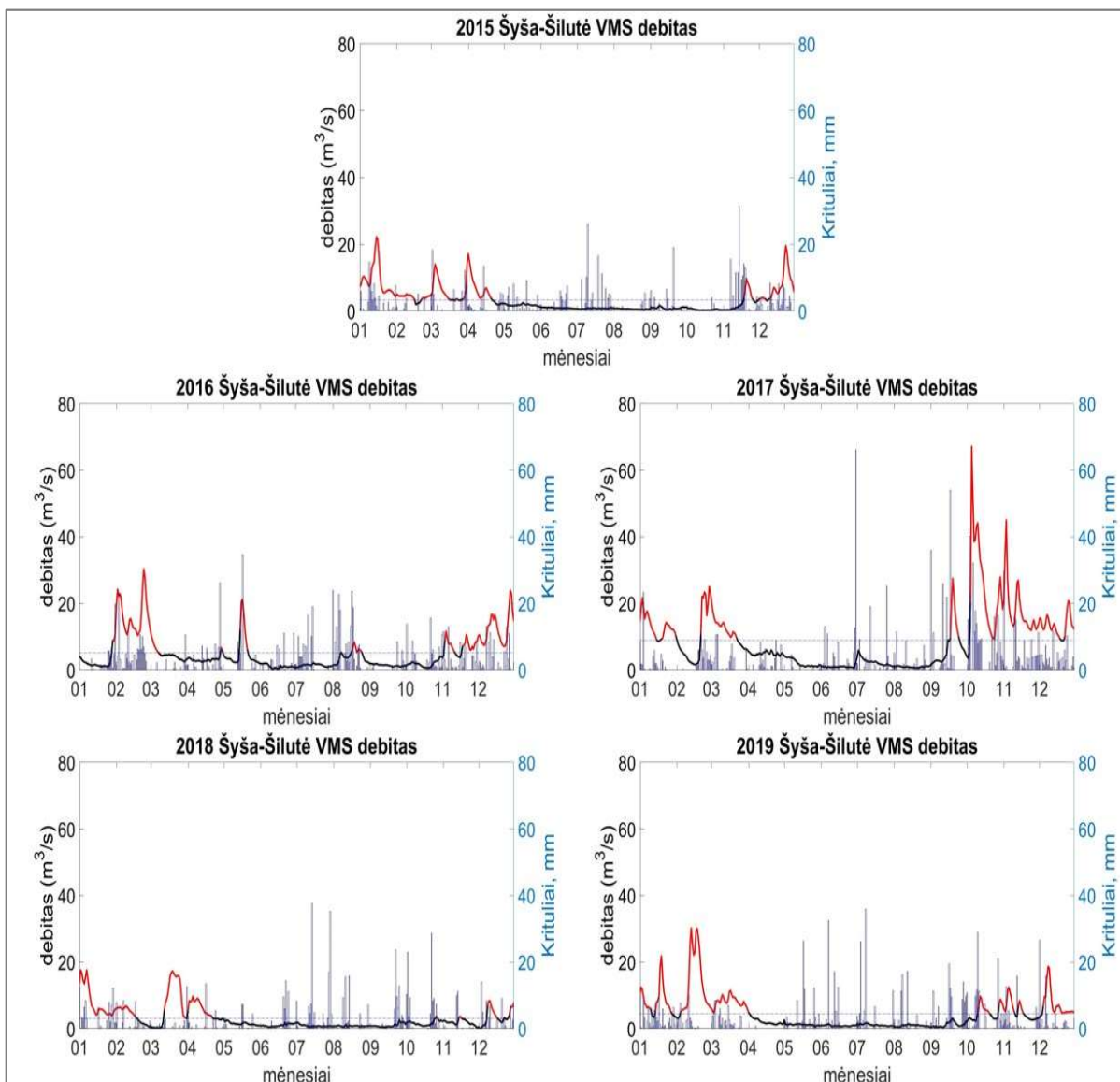
Užliejamų teritorijų plotas pagal skirtingus metodus statistiškai reikšmingai skyrėsi tyrimų laikotarpiu (Kruskal-Wallis testas,  $H=31,1$ ,  $p<0,05$ ). AMK metodo nepilnai užlietos augalijos plotų klasifikacija, suklasifikuotų užliejamų teritorijų vidutinis plotas ( $5,1 \pm 2,6$  %) statistiškai reikšmingai

skyrėsi nuo AMK metodo pilnai užlietos teritorijos ( $2,3 \pm 1,8 \%$ ) ir skirtumų metodo pilnai užlietu teritorijų klasifikacijos ( $2,5 \pm 2,4 \%$ ) vidurkių (Dunno testas,  $p < 0,05$ ) (20 pav.).



20 pav. Vidutinis užliejamų teritorijų plotas pagal skirtingus metodus (procentinė dalis nuo bendro tiriamosios teritorijos ploto, (2014,1 km<sup>2</sup>)) 2015-2019 metų laikotarpiu AMK (1) - pilnai užlietos teritorijos, panaudojant AMK metodą, AMK (2) – nepilnai užlietos augalijos plotai, panaudojant AMK metodą, Skirtumų – pilnai užlietos teritorijos, naudojant skirtumų metodą.

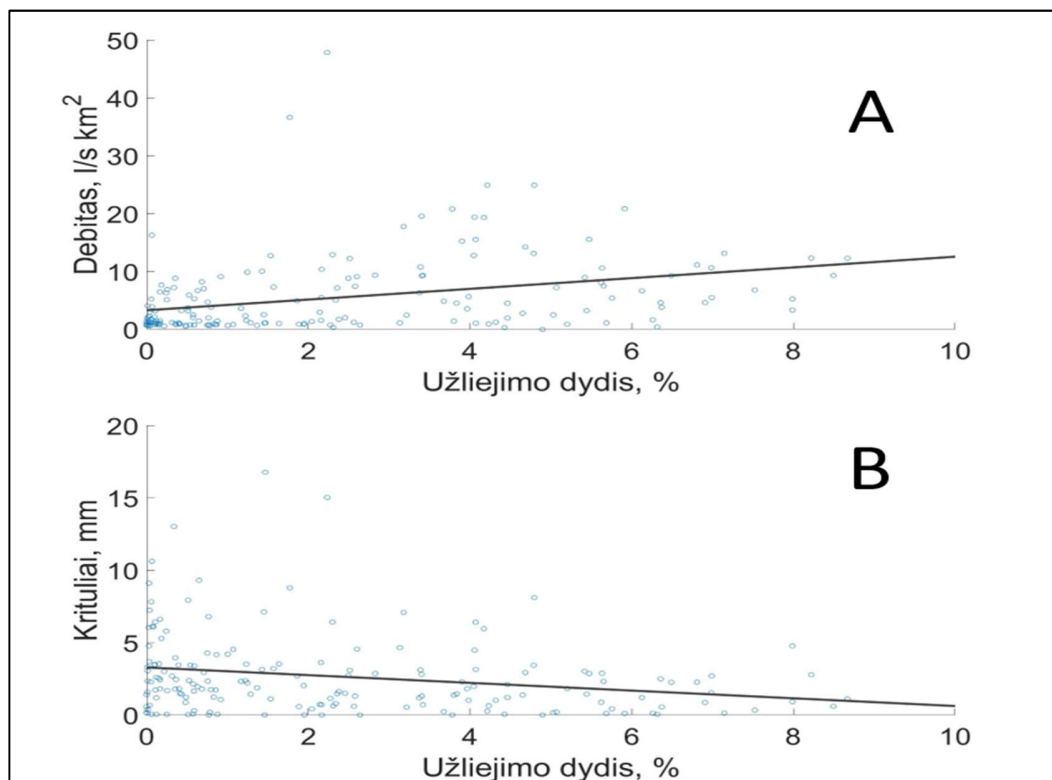
Potvyniai 2015-2019 m. buvo stebimi 2015 m. sausio 1 d. – 2015 balandžio 21 d., 2015 m. lapkričio 16 d. – 2015 m. gruodžio 31 d., 2016 m. sausio 30 d. – 2016 m. kovo 6 d., 2016 m. lapkričio 20 d. – 2017 m. vasario 2 d., 2017 m. vasario 21 d. – 2017 m. 18 d., 2017 m. spalio 5 d. – 2018 m. vasario 21 d., 2018 m. kovo 10 d. – 2018 m. kovo 28 d., 2019 m. vasario 4 d. – 2019 m. balandžio 1 d. Poplūdžių laikotarpiai 2015-2019 metų laikotarpiu buvo stebimi 2015 m. lapkričio 16 d. – 2015 m. lapkričio 20 d., 2016 m. gegužės 16 d. – 2016 m. gegužės 23 d., 2016 m. rugpjūčio 18 d. – 2016 m. rugpjūčio 21 d., 2017 m. rugsėjo 21 d. – 2017 m. rugsėjo 27 d., 2018 m. balandžio 1 d. – 2018 m. balandžio 17 d., 2018 m. gruodžio 25 d. – 2019 m. sausio 7 d., 2019 m. sausio 11 d. – 2019 m. sausio 20 d., 2019 m. spalio 14 d. – 2019 m. spalio 19 d., 2019 m. spalio 29 d. – 2019 m. lapkričio 11 d. (21 pav.).



21 pav. 2015-2019 m. laikotarpiu Šyšos ties Šilute VMS debitų hidrografas ir Šilutės HMS kritulių kiekis (punktyrinė linija – kiekvienų metų debitų vidurkis Šyšos ties Šilute VMS, raudona spalva – potvynio ar poplūdžio laikotarpis).

2015-2019 m. užlietų teritorijų kartografavimo duomenims buvo padarytas regresijos modelis, kuris rodo užliejamos teritorijos dydžio (%) ir Šyšos upės debito ( $l/s \text{ km}^2$ ) priklausomybę Nemuno deltoje. Determinacijos koeficientas  $R^2 = 0,10$ . Regresijos modelis  $Y = 0,9251x + 3,2937$ . Debito priklausomybė nuo užliejimo dydžio buvo teigiama ir silpna.

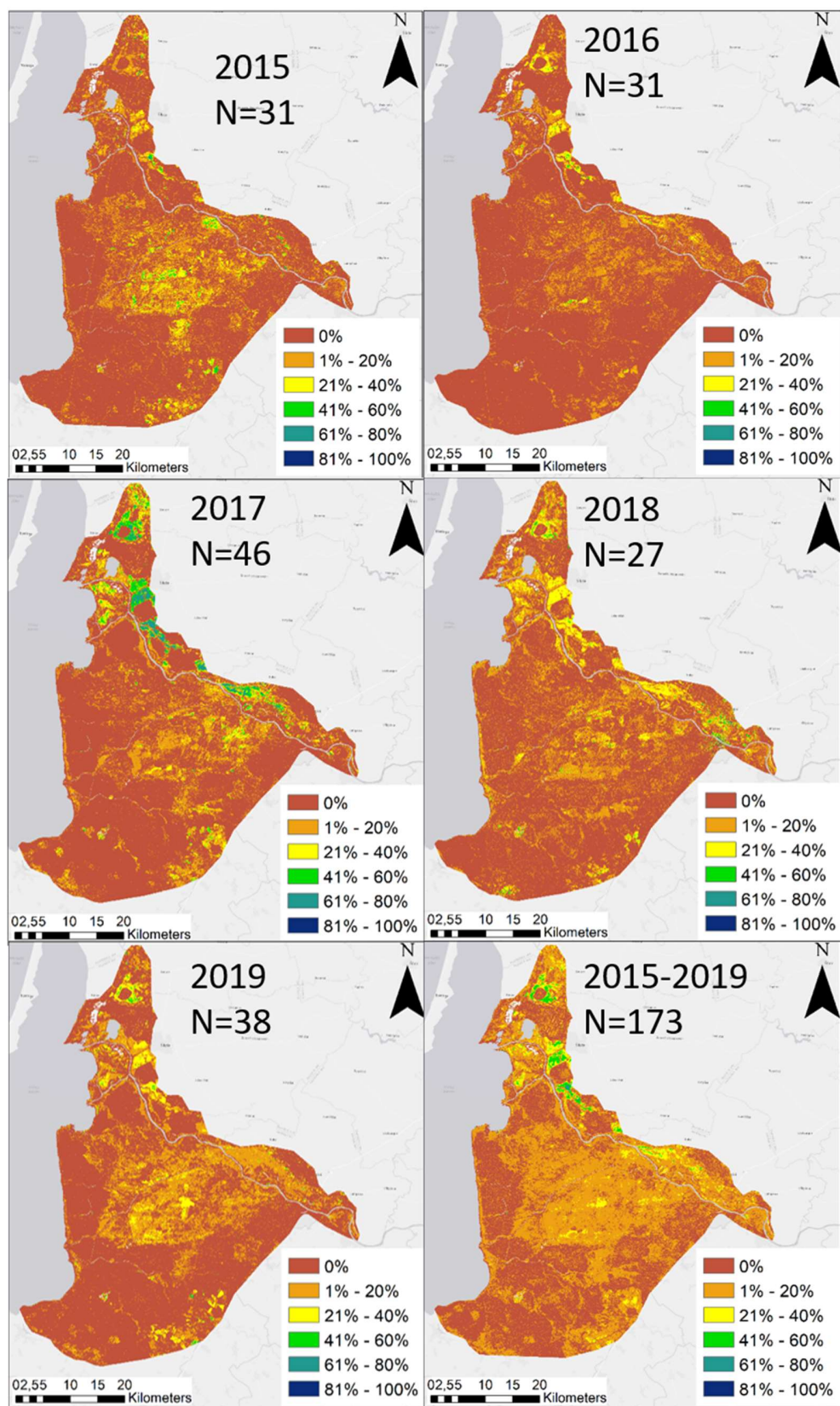
Taip pat buvo padarytas regresijos modelis, kuris rodo užliejamos teritorijos dydžio (%) nuo kritulių (mm) priklausomybę Nemuno deltoje. Determinacijos koeficientas  $R^2 = 0,05$ . Regresijos modelis  $Y = -0,2667x + 3,2813$ . Kritulių priklausomybė nuo užliejimo dydžio buvo neigiama ir silpna (22 pav.).



22 pav. 2015-2019 m. laikotarpio A) Šyšos ties Šilute VMS debitų; B) Šilutės HMS kritulių ir Nemuno deltos užliejamos teritorijos ploto (%) tiesinė regresija Nemuno deltoje.

### 3.3. Užliejamų teritorijų „karštieji taškai“

Nemuno deltoje užlietos teritorijos dažniau stebimos Lietuvos teritorijoje (dešiniajame Nemuno krante). Dažniausiai užlietos teritorijos 2015-2019 m. laikotarpiu buvo aplink Sakūčių ir Bundalų mišką (šiaurinėje Nemuno deltos dalyje). Šios vietos vidutiniškai buvo užlietos 41–80 % viso tiriamojo laikotarpio. Šiauriau Žalgirių miško ties Šyšos upės santaka su Nemunu 2015-2019 m. laikotarpiu teritorijos buvo užlietos 41-60 % laiko. Piečiau Žalgirių miško aplink Leitės upę 2015-2019 m. laikotarpiu teritorijos buvo užlietos 41-80 % laiko. Ties Gėgės upe, rytinėje Nemuno deltos dalyje 2015-2019 m. laikotarpiu teritorijos buvo užlietos 21-60 % laikotarpio. Rusijos dalyje (kairiajame Nemuno krante) užlietos teritorijos buvo nustatytos 2015, 2017 ir 2019 metais aplink Gilijos (Matrosovkos) upę, ties Staricos upe,. Didžioji dalis kairiojo Nemuno deltos kranto yra retai užliejama kaip dešinysis Nemuno deltos krantas. Mažiausiai užlietos teritorijos buvo pietrytinėje ir pietvakarinėje Nemuno deltos dalyse (abi esančios Rusijos, Kaliningrado srityje) (23 pav.).



23 pav. Užlietų teritorijų santykinis dažnumas 2015 - 2019 m. Nemuno deltoje.

### 3.4. Užliejamų teritorijų, nuosėdų ir žemėnaudos tipo bei topografijos erdviniai dėsningumai

2015 – 2019 m. laikotarpiu, ilgiausiai užlietos teritorijos išsilaikė ant moreninio priemolio, priemolio dangos, per šį tiriamąjį laikotarpį dalis vietovių, kurioms būdingos šios nuosėdos buvo užlietos 81 – 100 % tyrimo laikotarpiu. Taip pat santykinai ilgai užlietos teritorijos, esančios žemapelkių durpių (25,7 %), aleuritingo smėlio (15,4 %), sapropelio (13,1 %) ir durpių (10,1 %) dangos, iš kurių dalis teritorijos su šiomis nuosėdomis buvo aplietos 61 – 80 % viso tyrimo laiko. 2015 – 2019 m. laikotarpiu trumpiausiai užlietos teritorijos išsilaikė ant įvairaus molingo smėlio ir priemolio nuosėdų bei smėlio su žvirgždu sluoksnių. Nei vienoje iš teritorijų, su įvairaus molingo smėlio ir priemolio bei smėlio su žvirgždu nuosėdomis, vanduo neišsilaikė ilgiau nei 20 % viso tyrimo laiko (3 lentelė).

3 lentelė. Nuosėdų pasiskirstymas pagal 2015-2019 metų užlietų teritorijų dažnį 2015-2019 m. laikotarpiu. Skliausteliuose nurodyta kiekvieno nuosėdų sluoksniu užimama teritorija, tyrimo vietoje (%).

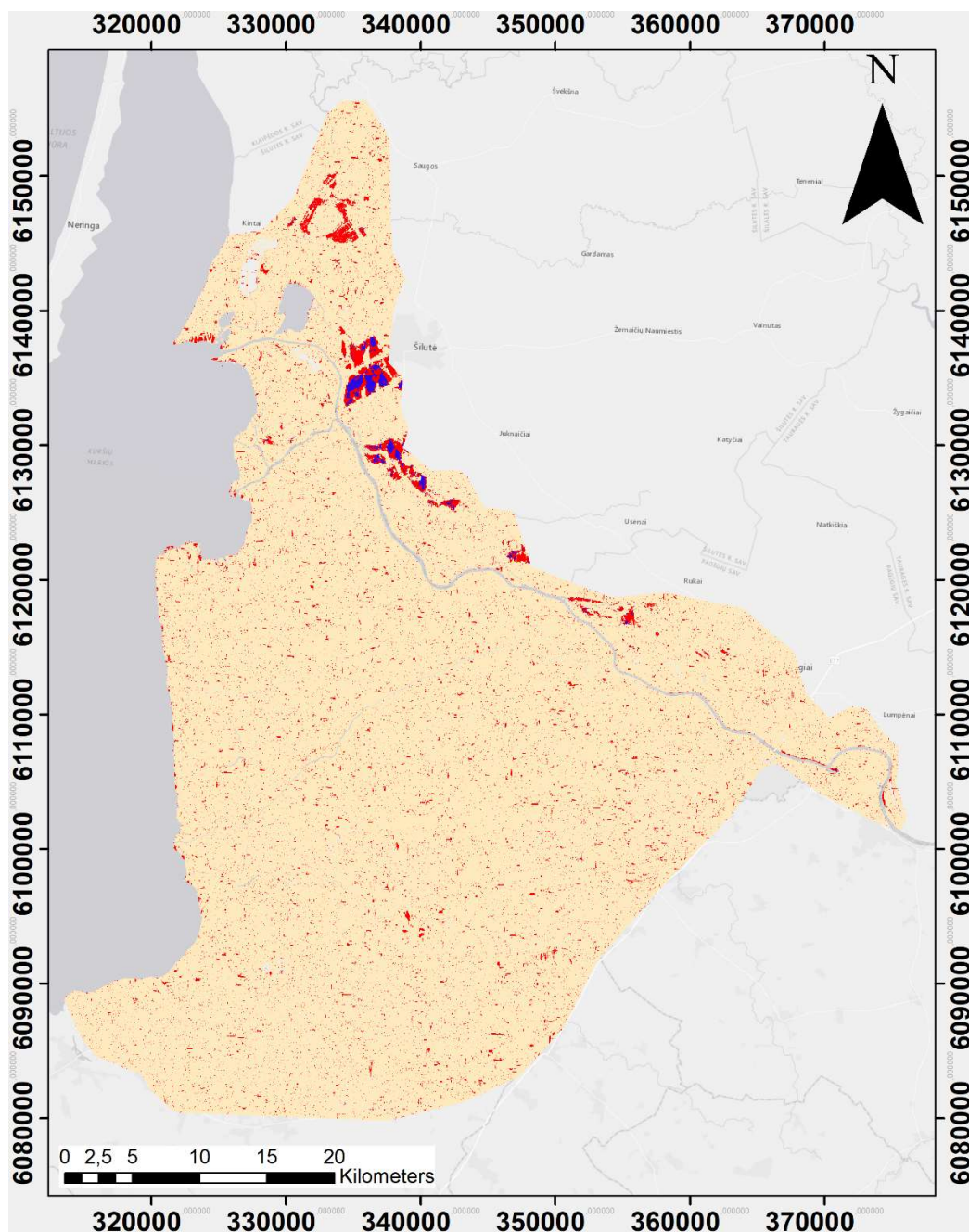
	0 %	0 – 20 %	21 – 40 %	41 – 60 %	61 – 80 %	81 – 100 %
<b>Aleuritas (0,6 %)</b>	0,9	5,7	2,7	1,2	0,0	0,0
<b>Aleuritingas molis (0,2 %)</b>	0,9	5,8	1,9	0,0	0,0	0,0
<b>Aleuritingas smėlis (3,8 %)</b>	0,7	4,6	10,6	7,1	15,4	0,0
<b>Aukštapelkių durpės (4,3 %)</b>	5,7	5,8	1,2	2,3	0,0	0,0
<b>Durpės (2,6 %)</b>	4,1	5,6	3,0	1,6	10,1	0,0
<b>Durpingas smėlis (0,5 %)</b>	4,8	5,9	1,4	0,0	0,0	0,0
<b>Įvairus molingas smėlis, priemolis (0,1 %)</b>	38,6	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Įvairus smėlis (3,1 %)</b>	3,2	5,2	6,5	4,1	0,1	0,0
<b>Molis (0,7 %)</b>	0,3	5,6	3,5	0,0	0,0	0,0
<b>Moreninis priemolis, priemolis (2,2 %)</b>	3,0	5,8	2,2	0,4	3,0	100,0
<b>Nenustatyta (1,1 %)</b>	0,8	4,5	9,5	11,5	25,3	0,0
<b>Sapropelis (16,8 %)</b>	0,9	3,8	13,7	21,8	13,1	0,0
<b>Smėlis smulkutis smulkus (1,1 %)</b>	6,2	5,9	1,1	0,0	0,0	0,0
<b>Smėlingas aleuritas (1,8 %)</b>	3,0	4,8	10,6	1,0	0,0	0,0
<b>Smėlis su žvirgždu (0,02 %)</b>	16,9	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Smulkus smėlis (37,5 %)</b>	1,6	4,9	8,0	5,5	1,8	0,0
<b>Smulkutis smėlis (10,4 %)</b>	1,9	4,6	9,9	8,5	5,6	0,0
<b>Vidutinis smėlis (0,7 %)</b>	4,6	5,6	3,4	1,1	0,0	0,0
<b>Žemapelkių durpės (12,5 %)</b>	2,0	3,7	10,9	34,0	25,7	0,0

2015 – 2019 m. laikotarpiu, ilgiausiai užlietos teritorijos buvo nustatytos pelkių vietovėse, per šį tiriamąjį laikotarpį dalis vietovių, su šiuo žemėnaudos tipu buvo užlietos 81 – 100 % laiko. Taip pat ilgai užlietos išsilaikė teritorijos, esančios dirbamuosiuose laukuose (47,6 %) ir krūmynuose (41,2 %), iš kurių dalis vietovių išliko užlietos 61 – 80 % viso tyrimo laiko. 2015 – 2019 m. laikotarpiu trumpiausiai užlietos teritorijos išsilaikė natūraliose pievose. Nei vienoje iš teritorijų, su natūraliomis pievomis, vanduo neišsilaikė ilgiau nei 40 % viso tyrimo laiko (4 lentelė).

4 lentelė. Žemėnaudos pasiskirstymas pagal 2015-2019 metų užlietų teritorijų dažnį 2015-2019 m. laikotarpiu. Skliausteliuose nurodyta kiekvieno žemėnaudos sluoksnio užimama teritorija, tyrimo vietoje (%).

	0 %	1 – 20 %	21 – 40 %	41 – 60 %	61 – 80 %	81 – 100 %
<b>Dirbtinis paviršius (1,1 %)</b>	21,3	18,0	5,7	0,5	0,0	0,0
<b>Dirbami laukai (82,9 %)</b>	3,6	13,2	39,9	83,7	47,6	0,0
<b>Miškai (5,6 %)</b>	44,9	18,3	2,2	2,8	0,0	0,0
<b>Natūralios pievos (0,2 %)</b>	2,7	15,0	37,0	0,0	0,0	0,0
<b>Krūmynai (2,2 %)</b>	16,8	17,5	9,5	9,4	41,2	0,0
<b>Pelkės (8 %)</b>	10,8	18,0	5,7	3,5	11,2	100,0

Topografinis drėgmės indeksas išskyrė labiausiai užliejimui palankias topografines vietas, iš kurių didžioji dalis tokių teritorijų aptikta Lietuvai priklausančioje Nemuno deltos dalyje. Potencialiausias užliejamos teritorijos buvo piečiau Žalgirių miško, ties Šyšos upės žemupiu, Medžioklės pelkėje, šiauriau Gėgės upės. Nemuno deltoje, Rusijos dalyje potencialių užliejimui palankių topografinių vietų išskirta buvo nedaug. Pagal topografinį drėgmės indeksą išskirtos teritorijos ir užlietos teritorijos su didesniu nei 41% dažnumu gautos iš palydovinių Sentinel-1 SAR duomenų pritaikius skirtumą tarp dviejų laikotarpių metodą atitiko 7%. Topografinis drėgmės indeksas neišskyrė teritorijos ties Sakūčių mišku, kuri buvo užlieta gana ilgą laiko tarpą bei identifikavo santykinai mažesnes potencialiai užliejamas teritorijas nei teritorijos gautos naudojant Sentinel-1 SAR palydovinius duomenis (24 pav.).



24 pav. Užliejamų teritorijų pasiskirstymas pagal topografinio drėgmės indeksą ir pagal Sentinel-1 SAR 2015-2019 m. duomenis. Smėlio spalva – nesuklasifikuotos teritorijos, raudona – užliejamų teritorijų „karštieji taškai“, kur dažnis buvo didesnis nei 41%, mėlyna – kur potencialiai užliejamos teritorijos pagal topografinį drėgmės indeksą sutapo su užliejamų teritorijų „karštaisiais taškais“.

## IV. REZULTATŲ APTARIMAS

Užliejamos teritorijos yra dinamiška ir labai besikeičianti aplinka, kuri kinta kiekvienu metų laikotarpiu. Tai yra svarbios vietovės ekologinei aplinkos būklei, nes tai yra palankios vietos šiltnamio efektą sukeliančių dujų – anglies dvideginio (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), susidarymui (Batson et al., 2015). Šiame tyrime buvo išskirtos užliejamos teritorijos ir įvertintas užliejimų dažnis Nemuno deltoje 2015-2019 m., ir kokios yra šių teritorijų savybės, galinčios daryti įtaką vandens išsilaikymo trukmei.

Darbe panaudoti palydoviniai Sentinel-1 sintetinės apertūros radarų (SAR) duomenys, kuriems pritaikytas skirtumų tarp dviejų laikotarpių metodas leido išskirti atviro vandens plotus, t.y., užlietas teritorijas labai geru tikslumu validuojant su dronu gautais duomenimis, kuris siekė 84,71 %. Naudojant skirtumų tarp dviejų laikotarpių metodą Schlafer et al., 2015 gavo 81,3 % bendrą tikslumą, bet validacija buvo atlikta, naudojant optinius palydovinius Landsat-8 duomenis. Naudojant atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodą buvo gauti dar geresni rezultatai nei naudojant skirtumų tarp dviejų laikotarpių metodą, kurių tikslumas išskiriant užliejimų plotus siekė 92,93 %. Atsitiktinio miško metodas taip pat geba išskirti nepilnai užlietą augaliją, kai tuo metu skirtumų metodu atliktas klasifikavimas nepilnai užlietą augaliją klasifikuoja kaip sausumą. Tsyganskaya et al., (2019) ir Cazals et al., (2016) atskirdami nepilnai užlietos augalijos plotus nuo atviro vandens telkinių gavo 82 % siekiantį tikslumą, bet duomenų validacija buvo vykdoma, naudojant optinius Sentinel – 2 palydovinius duomenis.

Lyginant šiame darbe naudotus metodus, galima teigti, kad atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodas yra sudėtingesnis, nes klasifikacijai yra reikalingi apmokymo duomenys. Bet šiuo metodu galima pasiekti tikslesnių ir detalesnių rezultatų, kuriuos naudojant galima išskirti įvairesnio pobūdžio klases (pvz., nepilnai užlietos augalijos plotus), dėl ko ženkliai išauga šių duomenų pritaikymo galimybės, pavyzdžiui, kartografuojant maliarinio uodo arealus (Tsyganskaya et al., 2020), vietoves, kur tikėtina bus pažeista augalija, pasėliai dėl užmirkimo (Vozinaki et al., 2015). Tuo tarpu skirtumų tarp dviejų laikotarpių metodas leidžia gauti tik binarinius duomenis, t.y., atskirti atvirą vandenį nuo sausumos. Kitą vertus, skirtumų tarp dviejų laikotarpių metodas gali būti netikslus, jei tarp tiriamo laikotarpio ir lyginamo laikotarpio įvyko žemės dangos pasikeitimas, pavyzdžiui, miško iškirtimas, nesusijęs su užliejimu, toks įvykis gali sukelti panašią slenkstinę santykio vertę ir atlikti neteisingą klasifikaciją (Ayhan et al., 2019).

Lyginant du metodus: atsitiktinio miško klasifikatoriaus ir skirtumų atviro vandens kartografavimo atveju reikšmingų skirtumų nebuvo aptikta, tai patvirtina, kad šie metodai nors ir visai skirtingi, bet pakankamai vienodai sukartografuoja atvirą vandenį. Dėlto abu šiuos metodus galima

naudoti pilnai užlietų teritorijų kartografavimui. Atsitiktinio miško metodu sukartografuoti nepilnai užlietos augalijos plotai reikšmingai skyrėsi nuo tuo pačiu metodu suklasifikuotų atviro vandens ploto ir nuo skirtumų metodu suklasifikuotų atviro vandens plotų. Nepilnai užlietos augalijos plotai buvo didesni nei atviro vandens plotai. Šie rezultatai sutapo su Tsyganskaya et al., 2019 gautais rezultatais, kuriuose taip pat nepilnai užlietos augalijos plotų buvo daugiau ir šie duomenys padėjo tiksliau įvertinti bendrą užliejamos teritorijos plotą, kuriuos naudojant skirtumų metodą pristatytą šiame tyrime nebūtų įmanoma įvertinti tiksliai.

Nemuno deltos atveju, naudojant atsitiktinio miško klasifikaciją VV poliarizacijoje atsiranda dvigubas atspindys nuo vandens paviršiaus, kas parodo nepilnai užlietos augalijos buvimą (Chini et al., 2016). Tuo tarpu naudojant VH poliarizaciją dvigubo atspindžio aptikti nepavyko, tačiau VH poliarizacija puikiai tinka atskirti atvirą vandenį nuo sausumos (Marti – Cardona et al., 2010). Tad šiame darbe buvo panaudotas šių dviejų poliarizacijų santykis VV/VH, kuris darbuose yra dažnai naudojamas būdas atskirti atvirą vandenį, nepilnai užlietos augalijos plotą ir sausumą (Montgomery et al., 2019). Naudojant skirtumų tarp dviejų laikotarpių metodą buvo naudojama VV poliarizacija, kuri geriausiai atskiria sausumą nuo atviro vandens (Cui et al., 2019) ir šio metodo atveju tai buvo tinkama poliarizacija išgauti norimus rezultatus. Tačiau, reikėtų paminėti, kad SAR signalo atspindys gali būti sutrikdytas įvairių aplinkos veiksnių. Pavyzdžiui, vėjo, stiprios liūtis ar ledo ir sniego darinių, kurie gali sutrikdyti ar visiškai pakeisti įprastą vandens atspindį ir taip sutrikdyti šių metodų tikslumą ir naudojimą (Moser et al., 2016).

Prieš tai vykdytose studijose, kuriose tiriamas užliejamų teritorijų plotas, buvo naudojami įvairūs validavimo būdai: Sentinel – 2 optiniai vaizdai (Tsyganskaya et al., 2019), vizualinė validacija iš lėktuvo (Canisius et al., 2019), *in situ* matavimai su LiDAR aplietose teritorijose (Montgomery et al., 2019). Šiame tyrime buvo panaudoti dronai, kurie turi keletą privalumų prieš kitus validavimo būdus, geresnę rezoliuciją nei optinių palydovinių duomenų, geresnę rezoliuciją ir tikslesnę geografinę pririšimą prie ant žemės paviršiaus esančių objektų, vizualinę apžvalgą, kuri gali padėti tiksliau identifikuoti objektus nei LiDAR duomenys. Tačiau, norint gauti dar geresnius ir tikslesnius užliejimų duomenis validacijai, naudinga būtų naudoti ant drono montuojamą multispektrinę kamerą, kuri leistų apskaičiuoti NDWI (*Normalised difference water index*) (Wang et al., 2018) ir suderinti vizualinę informaciją iš drono su multispektriniais duomenimis tikslesnei SAR duomenų validacijai.

Skirtingais metodais lyginant užlietų teritorijų plotą 2015-2019 laikotarpiu labiausiai išsiskyrė 2017 m. 2017 metais buvo sukartografuota daugiausiai užlietų teritorijų, naudojant ir atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodą, ir skirtumų metodą. Kad 2017 m. buvo išskirtinai drėgni, patvirtina ir 2018

metais parengta 2017 m. Lietuvos hidrometeorologijos veiklos ataskaita (Nr. TP12-02), kurioje minima, kad 2017 metų kritulių norma 174 mm buvo didesnė nei standartinė klimato norma, kas galėjo padidinti užlietų teritorijų plotą ir dažnumą tyrimo teritorijoje.

Užliejamų teritorijų „Karštųjų taškų“ ir nuosėdų pasiskirstymo dėsningumą analizės rezultatai šiame darbe parodė, kad ilgiausiai užlietos teritorijos užsilaiko ant moreninio priemolio, priesmėlio nuosėdų. Šis nuosėdų paviršius turi molio priemaišų, kurio granulimetrinė sudėtis yra smulkiausia (<0,02 mm). Kitose darbuose galima įžvelgti tendenciją, kad būtent molingi sluoksniai labai gerai sulaiko vandenį (Bogunovic et al., 2018) ir dirbamuose laukuose, kur yra molinga danga, tenka žemdirbiams naudoti įvairius žemės akėjimo būdus, kad vanduo neužsilaikytų (Ahmad et al., 2018). Rečiausiai užlietos nuosėdos tiriamuoju laikotarpiu buvo smėlis su žvirgždu, kurio granulimetrinė sudėtis buvo pati stambiausia (4-2 mm). Tokie rezultatai buvo aptinkami ir kituose darbuose, kur ant smėlio paviršiaus vanduo užsilaikydavo trumpiausiai (Pahlavan-Rad et al., 2018).

„Karštųjų taškų“ ir žemėnaudos analizės rezultatai šiame darbe parodė, kad ilgiausiai užlietos teritorijos užsilaiko pelkėtose vietovėse. Kiti tyrimai taip pat parodė, kad pelkės sugeba išlaikyti didelį kiekį drėgmės ilgą laiką ir tuo pačiu kontroliuoti didesnius užliejimus (Pattison-Williams et al., 2018). Pelkės taip pat prisideda ir prie vandens išsaugojimo žemės paviršiuje sausrų metu (Rizzo et al., 2018). Tai paaiškina, kodėl šiame darbe kai kuriose pelkėtose vietovėse užlietos teritorijų būvimo dažnis siekė daugiau nei 80 % viso tirtu laiko. Rečiausiai užliejamos teritorijos tiriamuoju laikotarpiu buvo natūralios pievos. Šie rezultatai skyrėsi nuo kitų straipsnių rezultatų, kuriuose minima, kad natūraliose pievose drėgmė užsilaiko ilgiau ir tokios teritorijos yra drėgmės šaltinis sausuoju metu laiku (Yang et al., 2018). Tokiems rezultatams galėjo padaryti įtakos tai, kad Nemuno deltoje natūralios pievos sudarė tik 0,2 % bendro ploto ir, tikėtina, buvo per mažas plotas patikimoms tendencijoms nustatyti.

Pagal topografinį drėgmės indeksą išskirtos teritorijos ir užlietos teritorijos su didesniu nei 41% dažnumu gautos iš palydovinių Sentinel-1 SAR duomenų pritaikius skirtumų metodą atitiko 7%. Šie rezultatai neišskyrė vietų, kurios dažnai pagal surinktus duomenis buvo užlietos gana ilgą laiko tarpą, pavyzdžiui, teritorijos ties Sakūčių mišku, kurios ir buvo naudojamos duomenų validavimui. Topografinis drėgmės indeksas įprastai koreliuoja gerai su užlietų teritorijų plotais ir vietomis, o taip pat yra tinkamas būdas išskirti užliejimams potencialias teritorijas (Lee et al., 2019; Blumenthal et al., 2019). Šių rezultatų mažą tikslumą galėjo lemti ir antropogeninė veikla, tokia kaip polderių ar siurblių įrengimas, kurios paskirsto vandenį ne pagal topografiškai palankias užliejimams teritorijas, pavyzdžiui, ties Sakūčių mišku, kurio užliejimai ir vandens išsilaikymas gali būti įtakojamas šalia esančios Klumbių siurblynės.

Palyginus Šilutės-Šyšos VMS debito ir Šilutės HMS kritulių kiekio ryšį su užlietų teritorijų plotais priklausomybė nebuvo nustatyta. Debito priklausomybė nuo užliejimo ploto buvo neigiama ir silpna, o kritulių priklausomybė nuo užliejimo ploto buvo teigiama, bet taip pat silpna. Šiuos rezultatus galėjo nulemti tai, kad pasibaigus potvynio ar poplūdžio laikotarpiui upės debitas nusenka daug greičiau negu užlietose teritorijose esantis vanduo, kuris dėl kitų priežasčių (antropogeninės veiklos, nuosėdų ar žemėnaudos) galėjo išlikti netgi per sausąjį laikotarpį (Gleason & Tangen, 2018).

Šiame tyrime panaudoti palydoviniai SAR duomenys ir klasifikavimo metodai siekiant sukartografuoti užliejamas teritorijas gali būti naudojami nuolatiniam erdviniam šių teritorijų monitoringui, kuris gali padėti identifikuoti problemines vietas ne tik Nemuno deltoje, bet ir didesnėje teritorijoje, pavyzdžiui Lietuvoje, ar visame Nemuno upės baseine. Šie duomenys gali būti panaudoti ilgiausiai užlietų teritorijų problemos sprendimams, kurie galėtų būti: melioracijos įrengimas ar atnaujinimas bei įvairūs kiti hidrotechniniai sprendimai, susiję su užlietų teritorijų valdymu. Šie sprendimai yra svarbūs įgyvendinant 2007 m. Europos Sąjungos priimtą potvynių direktyvą (2007/60/EC), kurios vienas iš tikslų yra sudaryti potvynių rizikos valdymo planus. Taip pat šis tyrimas gali prisidėti prie įvairių ekologinių tyrimų, susijusių su klimato kaita (šiltnamio efektą sukeliančių dujų išsiskyrimu), eutrofikacija Kuršių mariose dėl maistmedžiagių išplovimo, ar antropogeninės veiklos pasekmėmis vertinant sunkiųjų metalų išsiplovimo galimybes. Šios metodikos įgyvendinimo neriboja geopolitinė situacija tarp valstybių, kas leidžia pritaikyti šią metodiką visose pasaulio vietose, virš kurių SAR Sentinel-1 renka duomenis.

## IŠVADOS

1. Užliejamos teritorijos tiksliausiai buvo sukartografuotos palydovinius Sentinel-1 sintetinės apertūros radarų (SAR) duomenis suklasifikavus atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodu, kur  $92,9 \pm 2,2$  % atitiko užliejamas teritorijas nustatytas iš drono ortofotonuotraukų. Mažesnis tikslumas ( $84,7 \pm 11,2$  %) buvo gautas SAR palydovines nuotraukas suklasifikavus skirtumų metodu, šių metodų tikslumas statistiškai reikšmingai nesiskyrė.
2. Naudojant skirtumų ir atsitiktinio miško klasifikatoriaus metodus 2017 m. statistiškai reikšmingai išsiskyrė kaip didžiausio užliejimo metai (skirtumų –  $3,7 \pm 2,5$  %, AMK –  $2,7 \pm 2,2$  %), o 2016 m. statistiškai reikšmingai išsiskyrė kaip mažiausio užliejimo metai (skirtumų –  $1,5 \pm 2$  %, AMK –  $1,7 \pm 1,2$  %), 2015, 2018 ir 2019 m. reikšmingai tarpusavyje nesiskyrė. Nepilnai užlietos augalijos didžiausias plotas buvo 2017 m. ir siekė  $8,4 \pm 10,2$  %, mažiausias 2018 m. –  $2 \pm 1,2$  %, šie metai statistiškai reikšmingai skyrėsi tarpusavyje. Užliejamų teritorijų užimamo ploto kaitai debitas ir kritulių kiekis statistiškai reikšmingo poveikio neturėjo.
3. Užliejamų teritorijų „karštieji taškai“ 2015-2019 m. dažniausiai (41-80 % viso tyrimų laiko) buvo aptinkami dešiniajame Nemuno deltos krante: aplink Sakūčių ir Bundalų mišką (šiaurinėje Nemuno deltos dalyje), šiauriau Žalgirių miško ties Šyšos upės santaka su Nemunu. Rečiausiai užliejamos teritorijos buvo aptinkamos pietvakarinėje Nemuno deltos dalyje, Kaliningrado srityje.
4. Dažniausiai užlietos teritorijos buvo vietovėse, kur vyravo moreninio priemolio, priesmėlio nuosėdos (iki 100 %), o rečiausiai - smėlis su žvirgždu (iki 20 %). Ilgiausiai užlietos teritorijos stebėtos pelkėtose vietovėse (iki 100 %), o rečiausiai - natūralių pievų (iki 60 %) vietovėse. Pagal topografinį drėgmės indeksą išskirtos potencialiai užliejamos teritorijos mažai sutapo (7%) su užliejamomis teritorijomis pagal skirtumų metodu suklasifikuotus palydovinius SAR duomenis.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Adamo, M.; Matta, E.; Bresciani, M.; De Carolis, G.; Vaičiūtė, D.; Giardino, C.; Pasquariello, G. 2013. *On the synergistic use of SAR and optical imagery to monitor cyanobacteria blooms: The Curonian Lagoon case study*. Eur. J. Remote Sens. 46, 789–805.
2. Ahmad, M., Chakraborty, D., Aggarwal, P., Bhattacharyya, R., & Singh, R. 2018. Modelling soil water dynamics and crop water use in a soybean-wheat rotation under chisel tillage in a sandy clay loam soil. *Geoderma*, 327, 13-24.
3. Ayhan, B., & Kwan, C. 2019, October. A new approach to change detection using heterogeneous images. In *2019 IEEE 10th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)* (pp. 0192 – 0197). IEEE.
4. Ali, I., Cao, S., Naeimi, V., Paulik, C., & Wagner, W. 2018. *Methods to remove the border noise from Sentinel-1 synthetic aperture radar data: implications and importance for time – series analysis*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 11(3), 777 – 786.
5. Auerswald, K., Moyle, P., Seibert, S. P., & Geist, J. (2019). HESS Opinions: Socio – economic and ecological trade – offs of flood management – benefits of a transdisciplinary approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(2), 1035 – 1044.
6. Bagdavičiūtė, I.; Umgieser, G.; Vaičiūtė, D.; Bresciani, M.; Kozlov, I.; Zaiko, A. 2018. *GIS – based multi – criteria site selection for zebra mussel cultivation: Addressing end – of – pipe remediation of a eutrophic coastal lagoon ecosystem*. Sci. Total Environ., 634, 990–1003.
7. Batson, J., Noe, G. B., Hupp, C. R., Krauss, K. W., Rybicki, N. B., & Schenk, E. R. 2015. Soil greenhouse gas emissions and carbon budgeting in a short-hydroperiod floodplain wetland. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120(1), 77-95.
8. Basalykas, A. 1961. *Nemuno deltos žemuma*. Geografinis metraštis 4: 5 – 44.
9. Belgiu, M.; Drăguț, L. 2016. *Random Forest in Remote Sensing: A Review of Applications and Future Directions*. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., 114, 24–31.
10. Blumenthal, B., Haas, J., & Andersson, J. O. 2018. A GIS-based multivariate approach to identify flood damage affecting factors. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1-27.
11. Bogunovic, I., & Kisic, I. 2018. Compaction of a clay loam soil in pannonian region of Croatia under different tillage systems.

12. Brisco, B., Tiner, R., Lang, M., Klemas, V. 2015. *Mapping and monitoring surface water and wetlands with synthetic aperture radar*. In *Remote Sensing of Wetlands: Applications and Advances*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, pp. 119–136.
13. Canisius, F., Brisco, B., Murnaghan, K., Van Der Kooij, M., & Keizer, E. (2019). SAR backscatter and InSAR coherence for monitoring wetland extent, flood pulse and vegetation: A study of the Amazon lowland. *Remote Sensing*, 11(6), 720.
14. Cazals, C., Rapinel, S., Frison, P. L., Bonis, A., Mercier, G., Mallet, C., ... & Rudant, J. P. 2016. Mapping and characterization of hydrological dynamics in a coastal marsh using high temporal resolution Sentinel-1A images. *Remote Sensing*, 8(7), 570.
15. Chadyšienė R.; Girgždys A. 2008. *Ultraviolet radiation albedo of natural surfaces*, Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 16:2, 83 – 88.
16. Chelovechkova, A., Komissarova, I., & Eremin, D. 2018, November. Using basic hydrophysical characteristics of soils in calculating capacity of water-retaining fertile layer in recultivation of dumps of mining and oil industry. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 194, No. 9, p. 092004). IOP Publishing.
17. Chini, M.; Papastergios, A.; Pulvirenti, L.; Pierdicca, N.; Matgen, P.; Parcharidis, I. SAR coherence and polarimetric information for improving flood mapping. In Proceedings of the IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, Beijing, China, 10–15 July 2016; pp. 7577–7580.
18. Clement, M. A., Kilsby, C. G., & Moore, P. (2018). Multi-temporal synthetic aperture radar flood mapping using change detection. *Journal of Flood Risk Management*, 11(2), 152 – 168.
19. Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947 of 24 May 2019 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft. C/2019/3824.
20. Cui, B., Zhang, Y., Yan, L., Wei, J., & Wu, H. A. 2019. An unsupervised SAR change detection method based on stochastic subspace ensemble learning. *Remote Sensing*, 11(11), 1314.
21. Dabulevičienė, T.; Kozlov, I.E.; Vaičiūtė, D.; Dailidienė, I. 2018. *Remote Sensing of Coastal Upwelling in the South – Eastern Baltic Sea: Statistical Properties and Implications for the Coastal Environment*. Remote Sens. 10, 1752:1–1752:24.
22. De Chiara, G., Abdalla, S. 2014. “Active Techniques for Wind and Wave Observations: Scatterometer, Altimeter (& Sar)”, ECMWF Seminar 2014.
23. De Santi, F., Luciani G., Bresciani M., Giardino C., Lovergine F.P., Pasquariello G., Vaiciute D., De Carolis G., 2019. Synergistic Use of Synthetic Aperture Radar and Optical Imagery to Monitor

- Surface Accumulation of Cyanobacteria in the Curonian Lagoon. *Journal of Marine Science and Engineering* 7(12), 461.
24. Dellepiane, S. G., & Angiati, E. 2012. A new method for cross-normalization and multitemporal visualization of SAR images for the detection of flooded areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(7), 2765-2779.
  25. ESRI 2011. ArcGIS Desktop: Release 10.5. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
  26. Europos audito rūmai. 2018. *Potvynių direktyva: pažanga vertinant riziką, kartu planuojant ir tenkinant poreikį gerinti padėtį*. doi:10.2865/926071.
  27. Fan, Y., Clark, M., Lawrence, D. M., Swenson, S., Band, L. E., Brantley, S. L., ... & Yamazaki, D. 2019. Hillslope hydrology in global change research and Earth system modeling. *Water Resources Research*, 55(2), 1737-1772.
  28. Fawcett, K.R., Anderson, M.G., Bates, P.D., Jordan, J.P., Bathurst, J.C. 1995. The importance of internal validation in the assessment of physically based distributed models. *Transactions of the Institute of British Geographers* 20:248.
  29. Ferdous, M. R., Wesselink, A., Brandimarte, L., Di Baldassarre, G., & Rahman, M. M. (2019). The levee effect along the Jamuna River in Bangladesh. *Water international*, 44(5), 496 – 519.
  30. Filipponi, F. 2019. *Sentinel-1 GRD preprocessing workflow*. In Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings (Vol. 18, No. 1, p. 11).
  31. Gabriel, G. V., Oliveira, L. C., Barros, D. J., Bento, M. S., Neu, V., Toppa, R. H., ... & Navarrete, A. A. 2020. Methane emission suppression in flooded soil from Amazonia. *Chemosphere*, 250, 126263.
  32. Gleason, R. A., & Tangen, B. A. 2008. Chapter D: floodwater storage. *Ecosystem services derived from wetland conservation practices in the United States Prairie Pothole Region with an emphasis on the US Department of Agriculture Conservation Reserve and Wetlands Reserve Programs*, 1, 31.
  33. Grigat, M. 1931. *Die Memelniederung. Die Natur des Landes*. Königsberg.
  34. Grimaldi, S., Xu, J., Li, Y., Pauwels, V. R., & Walker, J. P. 2020. Flood mapping under vegetation using single SAR acquisitions. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111582.
  35. Grzybowski, M. 2019. The Principal Threats to the Standing Water Habitats in the Continental Biogeographical Region of Central Europe. *Journal of Landscape Ecology*, 12(2), 116 – 139.

36. Goffi, A., Stroppiana, D., Brivio, P. A., Bordogna, G., & Boschetti, M. 2020. Towards an automated approach to map flooded areas from Sentinel – 2 MSI data and soft integration of water spectral features. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 84, 101951.
37. Gudelis, V. 1998. *Lietuvos įjūris ir pajūris*. Vilnius: Lietuvos mokslas.
38. Hardy, A., Ettritch, G., Cross, D. E., Bunting, P., Liywalii, F., Sakala, J., ... & Thomas, C. J. 2019. *Automatic Detection of Open and Vegetated Water Bodies Using Sentinel 1 to Map African Malaria Vector Mosquito Breeding Habitats*. *Remote Sensing*, 11(5), 593.
39. Hoerer, T., & Kuenzer, C. 2020. Object detection and image segmentation with deep learning on Earth observation data: A review – part I: Evolution and recent trends. *Remote Sensing*, 12(10), 1667.
40. Huang, W., DeVries, B., Huang, C., Lang, M. W., Jones, J. W., Creed, I. F., & Carroll, M. L. 2018. Automated extraction of surface water extent from Sentinel-1 data. *Remote Sensing*, 10(5), 797.
41. Idzelytė, R.; Kozlov, I.E.; Umgieser, G. 2019. *Remote Sensing of Ice Phenology and Dynamics of Europe's Largest Coastal Lagoon (The Curonian Lagoon)*. *Remote Sens.*, 11, 2059.
42. Yang, B., Hawthorne, T. L., Hessing-Lewis, M., Duffy, E. J., Reshitnyk, L. Y., Feinman, M., & Searson, H. 2020. Developing an Introductory UAV/Drone Mapping Training Program for Seagrass Monitoring and Research. *Drones*, 4(4), 70.
43. Yang, L., Zhang, H., & Chen, L. 2018. Identification on threshold and efficiency of rainfall replenishment to soil water in semi-arid loess hilly areas. *Science China Earth Sciences*, 61(3), 292-301.
44. Katutis, K. 2007. "Nešmenų kiekio vandenyje kaita potvynio metu Nemuno žemupio pievose." *Žemdirbystė – Agriculture* 34.3: 113 – 128.
45. Kopecký, M., Macek, M., & Wild, J. 2021. Topographic Wetness Index calculation guidelines based on measured soil moisture and plant species composition. *Science of The Total Environment*, 757, 143785.
46. Kozlov, I.E.; Kudryavtsev, V.N.; Johannessen, J.A.; Chapron, B.; Dailidienė, I.; Myasoedov, A.G. 2012. *ASAR imaging for coastal upwelling in the Baltic Sea*. *Adv. Space Res.*, 50, 1125–1137.
47. Kussul, N., Shelestov, A., & Skakun, S. 2008. Grid system for flood extent extraction from satellite images. *Earth Science Informatics*, 1(3-4), 105.

48. Lang, M.; Bourgeau – Chavez, L.L.; Tiner, R.; Klemas, V. 2015. *Chapter 5 Advances in Remotely Sensed Data and Techniques for Wetland Mapping and Monitoring*. In *Remote Sensing of Wetlands: Applications and Advances*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
49. Lauknes, T.R.. 2011. "Rockslide mapping in Norway by means of interferometric SAR time series analysis."
50. Lee, J. – S. 1981. *Speckle Analysis and Smoothing of Synthetic Aperture Radar Images*. *Comput. Graph. Image Process.* 17, 24–32.
51. Lee, J. – S.; Pottier, E. 2009. *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
52. Lee, S., Lee, S., Lee, M. J., & Jung, H. S. 2018. Spatial assessment of urban flood susceptibility using data mining and geographic information System (GIS) tools. *Sustainability*, 10(3), 648.
53. Liang, J., & Liu, D. 2020. A local thresholding approach to flood water delineation using Sentinel–1 SAR imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 159, 53 – 62.
54. Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba. 2018. 2017 m. veiklos ataskaita. Prieiga internetu: <http://www.meteo.lt/documents/20181/119832/LHMT+2017+veiklos+ataskaita/daa912b2-5957-4804-8189-f2e6e8f1af58>
55. Li, Y.; Martinis, S.; Plank, S.; Ludwig, R. 2018. *An automatic change detection approach for rapid flood mapping in Sentinel–1 SAR data*. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 73, 123–135.
56. Marti – Cardona, B., Lopez – Martinez, C., Dolz – Ripolles, J., & Bladè – Castellet, E. 2010. ASAR polarimetric, multi – incidence angle and multitemporal characterization of Doñana wetlands for flood extent monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 114(11), 2802 – 2815.
57. Matthews, C. J., Joyce, E. M., Louis, V. L. S., Schiff, S. L., Venkiteswaran, J. J., Hall, B. D., ... & Beaty, K. G. 2005. Carbon dioxide and methane production in small reservoirs flooding upland boreal forest. *Ecosystems*, 8(3), 267-285.
58. Miranda, N.; Meadows, P.J. 2015. *Radiometric Calibration of S – 1 Level – 1 Products Generated by the S – 1 IPF*.
59. Miranda, N.; Hajduch, G. 2018. *Masking “No – Value” Pixels on GRD Products Generated by the Sentinel–1 ESA IPF*. *Issue*, 2, 14.
60. Montgomery, J., Brisco, B., Chasmer, L., Devito, K., Cobbaert, D., & Hopkinson, C. (2019). SAR and LiDAR temporal data fusion approaches to boreal wetland ecosystem monitoring. *Remote Sensing*, 11(2), 161.

61. Mougnot, J., Rignot, E., & Scheuchl, B. 2019. Continent-wide, interferometric SAR phase, mapping of Antarctic ice velocity. *Geophysical Research Letters*, 46(16), 9710-9718.
62. Moser, L., Schmitt, A., Wendleder, A., & Roth, A. 2016. Monitoring of the Lac Bam wetland extent using dual – polarized X – band SAR data. *Remote Sensing*, 8(4), 302.
63. Mousavi, S. M., Roostaei, S., & Rostamzadeh, H. 2019. Estimation of flood land use/land cover mapping by regional modelling of flood hazard at sub-basin level case study: Marand basin. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 1155-1175.
64. *Nemuno delta*. Tarybų Lietuvos enciklopedija, T. 3 (Masaitis – Simno) 1987. – Vilnius: Vyriausioji enciklopedijų redakcija, 197 psl.
65. Nemuno deltos potvyniai. Nemuno deltos regioninis parkas. Prieiga internetu: <http://www.nemunodelta.lt/16976/gamta/potvyniai.html>. [Žiūrėta: 2020 – 04 – 24].
66. Osmundsen P.T., Henderson I., Lauknes T.R., Larsen Y., Redfield T.F., Dehls J. 2009. *Active normal fault control on landscape and rock – slope failure in northern Norway*, *Geology*; v. 37; no. 2; p. 135–138.
67. Pahlavan-Rad, M. R., & Akbarimoghaddam, A. 2018. Spatial variability of soil texture fractions and pH in a flood plain (case study from eastern Iran). *Catena*, 160, 275-281.
68. Park, E., Merino, E., W Lewis, Q., O Lindsey, E., & Yang, X. 2020. A pathway to the automated global assessment of water level in reservoirs with synthetic aperture radar (SAR). *Remote Sensing*, 12(8), 1353.
69. Pattison-Williams, J. K., Pomeroy, J. W., Badiou, P., & Gabor, S. (2018). Wetlands, flood control and ecosystem services in the Smith Creek Drainage Basin: A case study in Saskatchewan, Canada. *Ecological economics*, 147, 36-47.
70. Pena-Regueiro, J. E. S. Ú. S., Sebastián-Frasquet, T. E. R. E. S. A., Aguilar-Maldonado, J. A., ESTORNELL, J., Sanchis-Blay, J. A., Morell-Monzó, S. E. R. G. I. O., & Altur-Grau, V. I. C. E. N. T. 2020. SENTINEL-2 ANALYSIS OF FLOODED AREAS: APPLIED CASE STUDY–LA SAFOR WETLAND, SPAIN. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 242, 63-70.
71. Pottier, E.; Ferro – Famil, L. 2012. *PolSARPro V5.0: An ESA Educational Toolbox Used for Self–Education in the Field of POLSAR and POL – INSAR Data Analysis*. In Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 22–27 July 2012; pp. 7377–7380.

72. Pulvirenti, L.; Pierdicca, N.; Chini, M.; Guerriero, L. 2009. *Monitoring Flood Evolution in Vegetated Areas Using COSMO – SkyMed Data: The Tuscany 2009 Case Study*. IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens., 6, 1807 – 1816.
73. Raduła, M. W., Szymura, T. H., & Szymura, M. (2018). Topographic wetness index explains soil moisture better than bioindication with Ellenberg's indicator values. *Ecological Indicators*, 85, 172-179
74. Rainys, A. 1977. *Deltos hidrologija*. Nemunas, d. 1. Vilnius: 47 – 58.
75. Rizzo, A., Bresciani, R., Masi, F., Boano, F., Revelli, R., & Ridolfi, L. (2018). Flood reduction as an ecosystem service of constructed wetlands for combined sewer overflow. *Journal of Hydrology*, 560, 150-159.
76. Ruwaimana, M., Satyanarayana, B., Otero, V., M. Muslim, A., Syafiq A, M., Ibrahim, S., ... & Dahdouh – Guebas, F. 2018. The advantages of using drones over space – borne imagery in the mapping of mangrove forests. *PloS one*, 13(7), e0200288.
77. Schlaffer, S., Matgen, P., Hollaus, M., & Wagner, W. 2015. Flood detection from multi – temporal SAR data using harmonic analysis and change detection. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38, 15 – 24.
78. Schmid, T., Guillaso, S., López – Martinez, J., Nieto, A., Mink, S., & Koch, M. (2018, July). Advances in mapping ice – free surfaces within the Northern Antarctic Peninsula region using polarimetric RADARSAT – 2 data. In *IGARSS 2018 – 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 216 – 219). IEEE.
79. Senthilnath, J., PB, S., Rajendra, R., Suresh, S., Kulkarni, S., & Benediktsson, J. A. (2019). Hierarchical clustering approaches for flood assessment using multi – sensor satellite images. *International Journal of Image and Data Fusion*, 10(1), 28 – 44.
80. *Sentinel-1*. Prieiga internetu: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/Sentinel-1>. [Žiūrėta: 2020 – 05 – 02].
81. Shannon, C.E. 1948. "A Mathematical Theory of Communication". *Bell System Technical Journal*. 27 (4): 623–666.
82. Sorbelli, F. B., Das, S. K., Pinotti, C. M., & Silvestri, S. (2018, May). On the accuracy of localizing terrestrial objects using drones. In *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (pp. 1 – 7). IEEE.

83. Souza, R., Hartzell, S., Ferraz, A. P. F., de Almeida, A. Q., de Sousa Lima, J. R., Antonino, A. C. D., & de Souza, E. S. 2021. Dynamics of soil penetration resistance in water-controlled environments. *Soil and Tillage Research*, 205, 104768.
84. Tiwari, V., Kumar, V., Matin, M. A., Thapa, A., Ellenburg, W. L., Gupta, N., & Thapa, S. (2020). Flood inundation mapping – Kerala 2018; Harnessing the power of SAR, automatic threshold detection method and Google Earth Engine. *Plos one*, 15(8), e0237324.
85. Töyrä, J., Pietroniro, A., Martz, L. W., & Prowse, T. D. 2002. A multi-sensor approach to wetland flood monitoring. *Hydrological processes*, 16(8), 1569-1581.
86. Tsyganskaya, V., Martinis, S., Marzahn, P., & Ludwig, R. 2018. *Detection of temporary flooded vegetation using Sentinel-1 time series data*. Remote Sensing, 10(8), 1286.
87. Tsyganskaya, V.; Martinis, S.; Marzahn, P.; Ludwig, R. 2018. *SAR – based detection of flooded vegetation—A review of characteristics and approaches*. Int. J. Remote Sens. 2018, 39, 2255–2293.
88. UN-SPIDER. In Detail: Recommended Practice: Flood Mapping and Damage Assessment using Sentinel-1 SAR data in Google Earth Engine. Prieiga internetu: <https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-google-earth-engine-flood-mapping/in-detail> [Žiūrėta: 2021-01-06].
89. Vaičiūtė, D., Olenina, I., Kavolytė, R., Dailidienė, I., and Pilkaitytė, R. 2010. “Validation of MERIS chlorophyll a products in the Lithuanian Baltic Sea case 2 coastal waters”, in Proc. of IEEE/OES Baltic International Symposium (BALTIC), Riga, Latvia, pp. 1 – 2, 2010.
90. Vaičiūtė, D., Bresciani, M., Bučas, M. 2012. Validation of MERIS bio – optical products with in situ data in the turbid Lithuanian Baltic Sea coastal waters. *Journal of Applied Remote Sensing* 6(1): 063568 – 1 – 063568 – 20.
91. Vaičiūtė, D., Bučas, M., Bresciani, M., Dabulevičienė, T., et al., 2021. Hot moments and hotspots of cyanobacteria hyperblooms in the Curonian Lagoon (SE Baltic Sea) revealed via remote sensing – based retrospective analysis. *Science of the Total Environment* 769, 145053.
92. Vaikasas, S. 2007. *Nešmenų sulaikymo baseino slėniuose analizė*. Vandens ūkio inžinerija.32 (52): 117 – 123.
93. Vozinaki, A. E. K., Karatzas, G. P., Sibetheros, I. A., & Varouchakis, E. A. 2015. An agricultural flash flood loss estimation methodology: the case study of the Koiliaris basin (Greece), February 2003 flood. *Natural Hazards*, 79(2), 899-920.

94. Wakabayashi, H., Motohashi, K., Kitagami, T., Tjahjono, B., Dewayani, S., Hidayat, D., & Hongo, C. 2019. FLOODED AREA EXTRACTION OF RICE PADDY FIELD IN INDONESIA USING SENTINEL-1 SAR DATA. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
95. Wang, P., Zhang, G., & Leung, H. 2018. Improving super-resolution flood inundation mapping for multispectral remote sensing image by supplying more spectral information. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16(5), 771 – 775.
96. Weiß, T. 2018. *sar - pre-processing Documentation*. Prieiga internetu: [https://buildmedia.readthedocs.org/media/pdf/multiply-sar-pre-rocessing/get\\_to\\_version\\_0.4/multiply-sar-pre-processing.pdf](https://buildmedia.readthedocs.org/media/pdf/multiply-sar-pre-rocessing/get_to_version_0.4/multiply-sar-pre-processing.pdf). [Žiūrėta: 2020-05-13]
97. Whalen, S. C. 2005. Biogeochemistry of methane exchange between natural wetlands and the atmosphere. *Environmental Engineering Science*, 22(1), 73-94.
98. Zuur, A., Ieno, E. N., Walker, N., Saveliev, A. A., & Smith, G. M. 2009. *Mixed effects models and extensions in ecology with R*. Springer Science & Business Media.
99. Žaromskis, R. 2013. *Nemuno delta*. Klaipėdos universiteto leidykla.