



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS

GEODEZIJOS IR KADASTRO KATEDRA

Viktorija Matuzevičiūtė

**SKAITMENINIŲ ERDVINIŲ LAZERINIO SKENAVIMO DUOMENŲ
KLASIFIKAVIMO ANALIZĖ IR TIKSLUMO TYRIMAS**

**CLASSIFICATION ANALYSIS AND ACCURACY STUDY OF DIGITAL
SPATIAL LASER SCANNING DATA**

Baigiamasis magistro darbas

Geodezijos ir kartografijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX036

GIS specializacija

Matavimų inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2021

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS

GEODEZIJOS IR KADASTRO KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Viktorija Matuzevičiūtė

**SKAITMENINIŲ ERDVINIŲ LAZERINIO SKENAVIMO DUOMENŲ
KLASIFIKAVIMO ANALIZĖ IR TIKSLUMO TYRIMAS**

**CLASSIFICATION ANALYSIS AND ACCURACY STUDY OF DIGITAL
SPATIAL LASER SCANNING DATA**

Baigiamasis magistro darbas

Geodezijos ir kartografijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX036

GIS specializacija

Matavimų inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

Dr. Dominykas Šlikas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

Dr. Aušra Žemienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2021

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
GEODEZIJOS IR KADASTRO KATEDRA

Matavimų inžinerijos studijų kryptis

Geodezijos ir kartografijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX036

GIS specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

.....Nr.
Vilnius

Studentei **Viktorijai Matuzevičiūtei**

Baigiamojo darbo tema: **skaitmeninių erdviųjų lazerinio skenavimo duomenų klasifikavimo analizė ir tikslumo tyrimas**

patvirtinta 2021 m. kovo 4 d. dekanų potvarkiu Nr. 37ap

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 201...m. d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS: atlikti skaitmeninio erdvinio lazerinio skenavimo duomenų klasifikavimą Global Mapper, LasTools ir CloudCompare programomis bei ištirti gautų rezultatų tikslumą. Gautus rezultatus apibendrinti išvadomis.

Vadovas
(Parašas)

Dr. Dominykas Šlikas

Užduotį gavau

.....
(Parašas)

Viktorija Matuzevičiūtė

.....
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Aplinkos inžinerijos fakultetas

Geodezijos ir kadastro katedra

ISBN

ISSN

Egz. sk. 1

Data-....-....

Geodezijos ir kartografijos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Skaitmeninių erdvinio lazerinio skenavimo duomenų klasifikavimo analizė ir tikslumo tyrimas**

Autorius **Viktorija Matuzevičiūtė**

Vadovas dr. **Dominykas Šlikas**

Kalba

lietuvių

užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjama skaitmeninių erdvinio lazerinio skenavimo duomenų klasifikavimo tema. Apžvelgtas oro LiDAR veikimo principas, LAS duomenų formatas. Apžvelgta klasifikuoti naudotų programų veikimo principai ir programose naudojami klasifikavimo algoritmai. Atlikta pradinių duomenų patikra. Atliktas duomenų klasifikavimas LasTools, CloudCompare ir Global Mapper programomis, išanalizuoti gauti rezultatai. Atliktas klasifikavimo rezultatų tikslumo tyrimas, palyginant gautus rezultatus su pradiniais duomenimis. Nustatyta, su kokia programa tiksliausiai suklasifikuota kiekviena duomenų klasė, identifikuoti klasifikavimo klaidų tipai. Suformuluotos ir pateiktos baigiamojo darbo išvados.

Darbą sudaro 8 dalys: įvadas, 5 skyriai, išvados, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 82 p. teksto be priedų, 123 iliustr., 12 lent., 48 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: „LiDAR“, klasifikavimas, lazerinis skenavimas, „CloudCompare“, „Global Mapper“, „LasTools“

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Environmental Engineering
Department of Geodesy and Cadastre

ISBN ISSN
Copies No. 1
Date-....-....

Geodesy and cartography study programme bachelor (master) thesis.

Title: **Classification analysis and accuracy study of digital spatial laser scanning data**

Author **Viktorija Matuzevičiūtė**

Academic supervisor dr. **Dominykas Šlikas**

Thesis language

Lithuanian

Foreign (English)

Annotation

In the master thesis, the topic of digital spatial laser scanning data classification is researched. The principle of airborne LiDAR and LAS data format are reviewed. The principles of operation of the programs used for classification and the classification algorithms used in the programs are reviewed. Verification of the original data was performed. Data classification using LasTools, CloudCompare and Global Mapper programs was performed, and the obtained results were analyzed. A study of the accuracy of the classification results was performed, comparing the obtained results with the original data. The program with which each data class was most accurately classified was determined, and the types of classification errors were identified. The conclusions are presented.

Structure: introduction, 5 parts, conclusions, references.

Thesis consist of: 82 p. text without appendixes, 123 pictures, 12 tables, 48 bibliographical entries.

Keywords: LiDAR, classification, laser scanning, CloudCompare, Global Mapper, LasTools

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	7
LENTELIŲ SĄRAŠAS	12
ĮVADAS	13
1. LiDAR veikimo principas	14
1.1. LiDAR duomenys, jų apdorojimas.....	16
1.2. LAS duomenų formatas	18
1.3. Duomenų klasifikavimas.....	21
2. Programų veikimo principai	24
2.1. CloudCompare programinės įrangos veikimo principas.....	24
2.2. Global Mapper programinės įrangos veikimo principas	26
2.3. LasTools programinės įrangos veikimo principas	28
3. Pradiniai duomenys	31
4. Duomenų klasifikavimas	36
4.1. Klasifikavimas CloudComapre programa.....	36
4.2. Klasifikavimas Global Mapper programa	38
4.3. Klasifikavimas LasTools programa	45
5. Klasifikavimo rezultatų tikslumo tyrimas	50
5.1. Žemės klasės tyrimas	52
5.2. Augmenijos klasės tyrimas.....	59
5.3. Pastatų klasės tyrimas.....	66
5.4. Elektros klasės tyrimas	73
IŠVADOS	77
Literatūros šaltiniai	79
PRIEDAI.....	83

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Atstumo matavimo lazeriu principas (Lohani, 2015)	14
1.2 pav. Topografinio LiDAR principas (Lohani, 2015)	14
1.3 pav. Batimetrinio LiDAR principas, (Lohani, 2015).....	15
1.4 pav. LiDAR duomenų pavyzdys	16
1.5 pav. Daugiau nei kartą atsispindėjusio lazerio pavyzdys (Lohani, 2015)	17
1.6 pav. GPS renkami duomenys (kairėje), IMU renkami duomenys (dešinėje), (Assi, 2016)	17
1.7 pav. Oro LiDAR duomenų apdorojimo proceso schema (Vosselman ir Maas, 2010)	18
1.8 pav. Antraštės bloko struktūra (ASPRS, 2019)	19
1.9 pav. Kintamo ilgio įrašo antraštės bloko struktūra (ASPRS, 2019)	19
1.10 pav. Taškinių duomenų įrašo formatas Nr. 10, (ASPRS, 2019).....	20
1.11 pav. Išplėstinio kintamo ilgio įrašo antraštės bloko struktūra (ASPRS, 2019).....	20
2.1 pav. Audinio modeliavimo principas: žalia spalva žymi išmatuotą paviršių, mėlyna spalva – apverstą paviršių, raudonas punktyras – sumodeliuotą audinį (Zhang et al., 2016)	24
2.2 pav. CFS metodo etapai: a) Pradinė būseną: audinys uždedamas ant apverstų LiDAR taškų; b) Apskaičiuojamas audinio dalelių poslinkis, veikiant gravitacijai; c) Audinio dalelių susikirtimo su LiDAR taškais tikrinimas. Dalelės esančios žemiau už LiDAR taškus yra perkeliama ant jų ir pažymimos kaip nejudinamos; d) Vidinių jėgų poveikis: judinamos dalelės juda veikiamos kaimyninių dalelių sukeltų jėgų (Zhang et al., 2016).....	25
2.3 pav. a) Trikampiai priskirto taško poslinkio analizavimas. α_i – kampai tarp trikampio plokštumos ir linijų, išvestų iš kiekvieno trikampio kampo B_i į priskirtą tašką P; b) TIN paviršiaus sutankinimas naujais taškais. Raudoni taškai žymi pradinio TIN paviršiaus viršūnes, mėlyni – papildomus tankinimo tašku (ISPRS, n.d.).....	30
3.1 pav. Pradinių duomenų paketas	31
3.2 pav. Tikrinimo pjūvių pozicijos.....	32
3.3 pav. Pradinių žemės klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 1.....	32
3.4 pav. Pradinių žemės klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 2.....	32
3.5 pav. Pradinių žemės klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 3.....	32
3.6 pav. Pradinių žemės klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 4.....	32
3.7 pav. Pradinių žemės klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 5.....	32
3.8 pav. Pradinių žemės klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 6.....	33
3.9 pav. Pradinių žemės klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 7.....	33
3.10 pav. Pradinių žemės klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 8.....	33
3.11 pav. Pradinių žemės klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 9.....	33

3.12 pav. Pradinių žemės klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 10.....	33
3.13 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo fragmentas	33
3.14 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo fragmentas	33
3.15 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 1	34
3.16 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 2	34
3.17 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 3	34
3.18 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 4	34
3.19 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 5	34
3.20 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 6	34
3.21 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 7	34
3.22 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 8	34
3.23 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 9	34
3.24 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 10	34
3.25 pav. Pradinių pastatų klasės duomenų tikrinimo fragmentas	35
3.26 pav. Pradinių pastatų klasės duomenų tikrinimo fragmentas	35
3.27 pav. Pradinių elektros klasės duomenų tikrinimo fragmentas	35
4.1 pav. Žemės klasė su klasifikuota pagal numatytus parametrus	36
4.2 pav. <i>CloudCompare</i> klasifikavimo rezultatai: žemės taškų klasė (kairėje), ne žemės taškų klasė (dešinėje)	37
4.3 pav. Kontrolinių pjūvių pozicijos: išilginiai pjūviai (kairėje), skersiniai pjūviai (dešinėje)	37
4.4 pav. Išilginis pjūvis Nr. 1	37
4.5 pav. Išilginis pjūvis Nr. 2	37
4.6 pav. Išilginis pjūvis Nr. 3	38
4.7 pav. Išilginis pjūvis Nr. 4	38
4.8 pav. Išilginis pjūvis Nr. 5	38
4.9 pav. Skersinis pjūvis Nr. 6	38
4.10 pav. Skersinis pjūvis Nr. 7	38
4.11 pav. Skersinis pjūvis Nr. 8	38
4.12 pav. Skersinis pjūvis Nr. 9	38
4.13 pav. Skersinis pjūvis Nr. 10	38
4.14 pav. Žemės klasė 2D aplinkoje	39
4.15 pav. Žemės klasė 3D aplinkoje	39
4.16 pav. Žemės klasės kontrolinis pjūvis	39
4.17 pav. Žemės klasės kontrolinis pjūvis	40
4.18 pav. Žemės klasės kontrolinis pjūvis	40

4.19 pav.	Global Mapper klasifikavimo rezultatai 2D aplinkoje.....	41
4.20 pav.	Global Mapper klasifikavimo rezultatai 3D aplinkoje.....	41
4.21 pav.	Antro klasifikavimo etapo kontrolinis pjūvis.....	41
4.22 pav.	Antro klasifikavimo etapo kontrolinis pjūvis.....	42
4.23 pav.	Antro klasifikavimo etapo kontrolinis pjūvis.....	42
4.24 pav.	Antro klasifikavimo etapo kontrolinis pjūvis.....	42
4.25 pav.	Elektros klasė išskirta geltona spalva.....	43
4.26 pav.	Elektros klasė išskirta raudona spalva	43
4.27 pav.	Suklasifikuota elektros klasė: 2D vaizde išskirta raudona spalva (kairėje), 3D vaizde išskirta geltona spalva (dešinėje).....	44
4.28 pav.	Suklasifikuota elektros klasė: 2D vaizde išskirta raudona spalva (kairėje), 3D vaizde išskirta geltona spalva (dešinėje)	44
4.29 pav.	LasTools suklasifikuota žemės klasė: 2D aplinkoje (kairėje), 3D aplinkoje (dešinėje) ...	45
4.30 pav.	Išilginis pjūvis Nr. 1	45
4.31 pav.	Išilginis pjūvis Nr. 2.....	45
4.32 pav.	Išilginis pjūvis Nr. 3	46
4.33 pav.	Išilginis pjūvis Nr. 4.....	46
4.34 pav.	Išilginis pjūvis Nr. 5	46
4.35 pav.	Skersinis pjūvis Nr. 6	46
4.36 pav.	Skersinis pjūvis Nr. 7	46
4.37 pav.	Skersinis pjūvis Nr. 8	46
4.38 pav.	Skersinis pjūvis Nr. 9	46
4.39 pav.	Skersinis pjūvis Nr. 10.....	46
4.40 pav.	<i>LasHeight</i> skaičiavimų rezultatų ištrauka	46
4.41 pav.	Pirmo klasifikavimo bandymo rezultatai	47
4.42 pav.	Pirmo klasifikavimo bandymo rezultatai	47
4.43 pav.	Antro klasifikavimo bandymo rezultatai.....	48
4.44 pav.	Trečio klasifikavimo bandymo rezultatai	49
4.45 pav.	LasTools klasifikavimo rezultatai: augmenijos klasė (kairėje), pastatų klasė (dešinėje) .	49
5.1 pav.	Cloud2Cloud metodo principinė schema (CloudCompare, 2015).....	50
5.2 pav.	Atstumo iki artimiausio kaimyno skaičiavimo pavyzdys	51
5.3 pav.	C2C skaičiavimo rezultatai (kairėje), duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)	52
5.4 pav.	C2C skaičiavimo rezultatai 0–20 cm intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)	52

5.5 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0,2–8,73 m intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)	53
5.6 pav. C2C skaičiavimo rezultatai (kairėje), duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)	54
5.7 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0–20 cm intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)	54
5.8 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0,2–8,57 m intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)	55
5.9 pav. C2C skaičiavimo rezultatai (kairėje), duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)	56
5.10 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0–20 cm intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)	56
5.11 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0,2–7,84 m intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)	57
5.12 pav. Žemės klasės rezultatų palyginimo diagrama	58
5.13 pav. C2C skaičiavimo rezultatai (kairėje), duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)	59
5.14 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0,01–2,5 m intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)	60
5.15 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 2,5–61,73 m intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)	60
5.16 pav. Didžiausių nuotolių intervalas sugretintas su pradine augmenijos klase	61
5.17 pav. C2C skaičiavimo rezultatai (kairėje), duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)	62
5.18 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0,01–2,5 m intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)	63
5.19 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 2,5–37,52 m intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)	63
5.20 pav. Didžiausių nuotolių intervalas sugretintas su pradine augmenijos klase	64
5.21 pav. Augmenijos klasės rezultatų palyginimo diagrama	65
5.22 pav. C2C skaičiavimo rezultatai (kairėje), duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)	66
5.23 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0,0–0,13 m intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)	67
5.24 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0,13–35,0 m intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)	67
5.25 pav. Identifikuoti klaidingai suklasifikuoti objektai	67
5.26 pav. Taškai nuo pradinės pastatų klasės nutolę 2–9 m atstumu	68
5.27 pav. Sugretintos pradinė (mėlynas spalva) ir LasTools (raudona spalva) pastatų klasės	68
5.28 pav. C2C skaičiavimo rezultatai (kairėje), duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)	69

5.29 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0,13–9 m intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)	70
5.30 pav. Taškai nuo pradinių duomenų pastatų klasės nutolę per 2–9 m atstumu.....	70
5.31 pav. Taškai nuo pradinių duomenų pastatų klasės nutolę per 2–9 m atstumu.....	70
5.32 pav. Didžiausių nuotolių intervalas sugretintas su pradine pastatų klase	71
5.33 pav. Sugretintos originali (mėlyna spalva) ir <i>Global Mapper</i> (raudona spalva) pastatų klasės	71
5.34 pav. Augmenijos klasės rezultatų palyginimo diagrama	73
5.35 pav. C2C skaičiavimo rezultatai (kairėje), duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje).....	74
5.36 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0,0–1,0 m intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)	74
5.37 pav. Sugretinti pradinės ir <i>Global Mapper</i> elektros klasių taškai. Balta spalva išskirta pradinė elektros klasė, raudona – <i>Global Mapper</i> 0–1 m (kairėje) ir 1–610,60 m (dešinėje) intervalų taškai	75

LENTELIŲ SĄRAŠAS

5.1 lentelė. <i>LasTools</i> suklasifikuotų žemės klasės taškų pasiskirstymas intervalais	53
5.2 lentelė. <i>Global Mapper</i> suklasifikuotų žemės klasės taškų pasiskirstymas intervalais	55
5.3 lentelė. <i>CloudCompare</i> suklasifikuotų žemės klasės taškų pasiskirstymas intervalais	57
5.4 lentelė. Aptiktų pradinės žemės klasės taškų kiekis	59
5.5 lentelė. <i>LasTools</i> suklasifikuotų augmenijos klasės taškų pasiskirstymas atstumo intervalais ...	61
5.6 lentelė. <i>Global Mapper</i> suklasifikuotų augmenijos klasės taškų pasiskirstymas intervalais	64
5.7 lentelė. Aptiktų pradinės augmenijos klasės taškų kiekis	65
5.8 lentelė. <i>LasTools</i> suklasifikuotų pastatų klasės taškų pasiskirstymas intervalais	69
5.9 lentelė. <i>Global Mapper</i> suklasifikuotų pastatų klasės taškų pasiskirstymas intervalais	72
5.10 lentelė. Aptiktų pradinės pastatų klasės taškų kiekis	73
5.11 lentelė. <i>Global Mapper</i> suklasifikuotų elektros klasės taškų pasiskirstymas 0–1 m intervale ..	75
5.12 lentelė. Aptiktų pradinės elektros klasės taškų kiekis	76

ĮVADAS

Skaitmeninis erdvinis lazerinis skenavimas gali būti atliekamas ypač populiaria ir daug kur pritaikoma LiDAR (angl. *light detection and ranging*) technologija. Skenavimas gali būti antžeminis ir atliekamas iš oro. Šiame darbe nagrinėjamas skenavimas iš oro. Šis skenavimo tipas gali būti naudojamas didelėms teritorijoms, miestams, miškams, neurbanizuotoms teritorijoms skenuoti ir pan. Skenavimo metu gaunami dideli duomenų kiekiai, kuriems reikalingas apdorojimo procesas. Viena iš šio proceso dedamųjų yra taškinių duomenų klasifikavimas. Suklasifikuoti duomenys, kurie patenka į žemės klasę, gali būti naudojami generuojant DTM, tiriant reljefo pokyčius ir panašiams uždaviniams spręsti. Tuo tarpu suklasifikavus kitomis klasėmis, tokiomis kaip augmenijos, pastatų, infrastruktūrinių objektų ir kitos klasės, duomenis galima lengviau valdyti, bei analizuoti. LiDAR duomenų klasifikavimą galima atlikti naudojant įvairius klasifikavimo algoritmus, bei programines įrangas. Šiame darbe duomenų klasifikavimas atliekamas naudojant tris skirtingas programas.

Darbo objektas – 1 km² ploto teritorija, esanti Trakų r.

Darbo tikslas – atlikti skaitmeninio erdvinio lazerinio skenavimo duomenų klasifikavimą ir išanalizuoti gautų rezultatų tikslumą.

Darbo uždaviniai:

1. Atlikti LiDAR veikimo principo apžvalgą.
2. Apžvelgti LAS duomenų formato sandarą.
3. Išnagrinėti klasifikuoti naudotų programų veikimo principų teorinę dalį.
4. Atlikti duomenų klasifikavimą *CloudCompare*, *GlobalMapper*, *LasTools* programomis.
5. Palyginti suklasifikuotus duomenis, *CloudCompare*, *GlobalMapper*, *LasTools* programomis, su pradiniais suklasifikuotais duomenimis ir įvertinti klasifikavimo tikslumą.

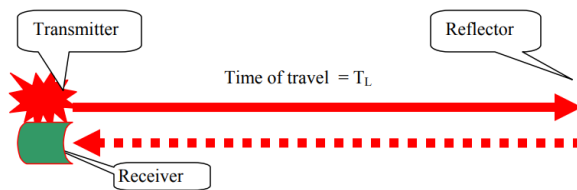
1. LiDAR veikimo principas

LiDAR – tai nuotolinių tyrimų metodas, kurį taikant lazeriu išmatuojamas atstumas iki žemės. LiDAR sistemą paprastai sudaro lazeris, skaitytuvas ir GPS imtuvas. Išskiriami du pagrindiniai tipai (Lohani, 2015; Hilker et al., 2012; Vosselman ir Mass, 2010):

1) Oro LiDAR (anlg. *airboneLiDAR*) sistemos įmontuotos į lėktuvus, dronus, bepiločius orlaivius ir pan. Šis tipas dar išskiriamas į du papildomus: topografinį ir batimetrinį. Topografinės LiDAR sistemos naudojamos žemės paviršiui (miestų, miškų, neurbanizuotų teritorijų), o batimetrinės – vandens telkinių dugnei skenuoti.

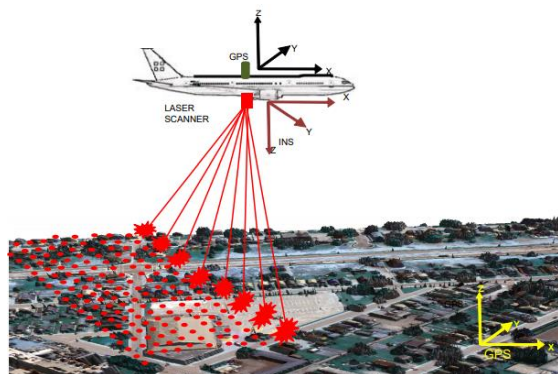
2) Antžemino LiDAR (anlg. *terrestrial LiDAR*) sistemos montuojamos ant automobilių arba trikojų. Naudojamos gatvėms, pastatams, tuneliams skenuoti. Skirstomos į statinį ir mobilių.

Atstumo matavimo principas LiDAR sistemomis panašus į elektroninių atstumo matavimų instrumentų (EDMI) principą, kur lazeris (lazerio impulsas arba ištiesinė banga) yra išspinduliuojamas iš siųstuvo ir užfiksuojamas nuo reflektoriaus atsispindėjęs signalas (1.1 pav.). Išmatavus lazerio sklaidimo laiką (anlg. *time of travel (TOT)*) nustatomas atstumas tarp siųstuvo ir reflektoriaus. Reflektorių gali atstoti tiek specialios prizmės, tiek natūralūs objektai (Lohani, 2015).



1.1 pav. Atstumo matavimo lazeriu principas (Lohani, 2015)

Topografinis LiDAR tipas skirtas žemės paviršiui skenuoti. Šią LiDAR sistemą, sudaro lazeris, GPS imtuvas ir INS (inercinė navigacinė sistema) (1.2 pav.). Lazeris apima spinduliuojantį diodą, kuris tam tikru dažniu generuoja šviesos šaltinį. Užfiksuojamas laiko skirtumas tarp išspinduliuoto ir grįžusio atsispindėjusio signalo. Žinant šviesos sklaidimo greitį ir lazerio sklaidimo laiką, apskaičiuojamas atstumas tarp lazerio siųstuvo ir lazerį atspindėjusio paviršiaus. GPS ir INS prietaisai, naudojami nustatyti taško 3D poziciją ir lazerinio skenerio orientaciją kiekvienoje matavimo epochoje (AAMHatch, 2006).



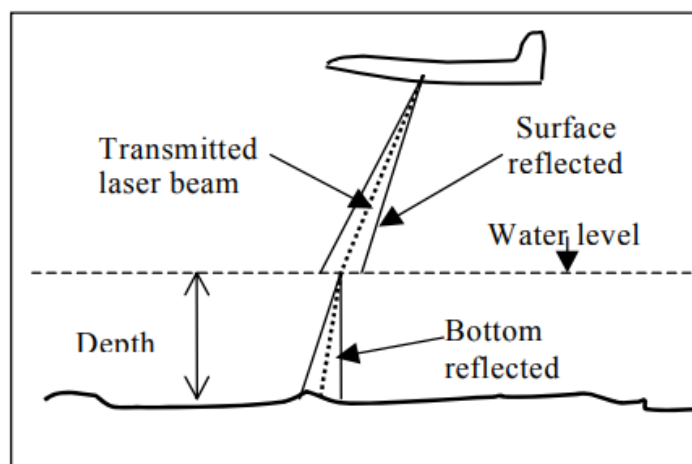
1.2 pav. Topografinio LiDAR principas (Lohani, 2015)

Naudojant besisukančius veidrodžius, esančius lazerio siūstuvo viduje, lazerio spindulys yra pakreipiamas statmenai skrydžio kryptčiai. Pakeitus veidrodžio sukimosi kryptį pasirinktu kampu, lazerio impulsai gali būti skleidžiami pirmyn ir atgal viso skrydžio metu. Skenavimo skiriamoji geba nustatoma pagal skenavimo kampą ir skrydžio aukštį. Kuo didesnis skrydžio aukštis, tuo didesnė skenuojamos teritorijos dalis yra aprėpiama ir gaunama mažesnė skiriamoji geba (Quadros, Collier ir Fraser, 2008). Oro LiDAR sistemose paprastai naudojami lazeriai, kurių bangos ilgis yra 1000–1600 nm (Zahang et al., 2016).

Topografinio LiDAR vertikaliojo atstumo tikslumas priklauso nuo kelių išorinių faktorių (Turton, 2006):

- skrydžio aukščio;
- spindulio divergencijos (lazerio kritimo kampo);
- taško pozicijos skenavimo ruože;
- GPS geometrijos;
- IMU matavimo dažnio;
- turbulencijos;
- atstumo nuo pagrindinės GPS stoties.

Batimetrinis LiDAR tipas yra skirtas vandens telkinių dugnams matuoti. Priklausomai nuo vandens skaidrumo, LiDAR sistemomis galima išmatuoti nuo 0,9 iki 40 m gylio vandens telkinius, su vertikaliu ± 15 cm ir horizontaliu $\pm 2,5$ m tikslumu. Lazerio impulsui pasiekus vandens paviršių (1.3 pav.) dalis išspinduliuotos energijos grįžta į orlaivyje esantį optinį imtuvą, o likusi dalis keliauja iki vandens telkinio dugno, kurį pasiekus atsispindi ir grįžta į optinį imtuvą. Gylis apskaičiuojamas, remiantis laiko skirtumu tarp atspindžių, sugrįžusių nuo vandens paviršiaus ir vandens telkinio dugno (Lohani, 2015).



1.3 pav. Batimetrinio LiDAR principas, (Lohani, 2015)

Norint apskaičiuoti vandens telkinio gylį, signalo atspindžiai nuo vandens paviršiaus ir dugno turi būti aiškiai atskiriami. Vietose, kur vandens telkinys nėra gilus, šie signalai sutampa, todėl vandens gylis nustatyti neįmanoma. Batimetriniame LiDAR naudojami mėlynos arba žalios spalvos lazerio spinduliai, nes jie geriau pernešami vandenyje, o tai leidžia pasiekti geresnius matavimų rezultatus. Hibridinėje LiDAR sistemoje naudojami infraraudonieji ir žalieji lazeriai. Infraraudonojo lazerio spindulys atsispindi nuo sausumos arba vandens paviršiaus, o žaliasis perėjęs per vandenį, atsispindi nuo vandens telkinių dugnų. Tai leidžia vienu metu užfiksuoti tiek žemės paviršiaus topografinę situaciją, tiek vandens dugno batimetriją (Lohani, 2015).

1.1. LiDAR duomenys, jų apdorojimas

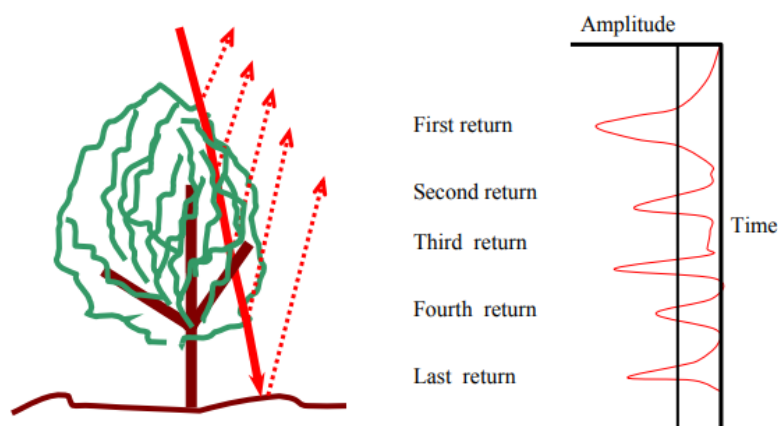
LiDAR duomenys gali būti dviejų tipų: diskretiško grįžimo ir pilnos bangos. Renkant diskrečiuosius duomenis, grįžtantis spindulys yra skaičiuojamas tik tuo atveju, jei jis viršija iš anksto nustatytą intensyvumo ribą. Šio tipo duomenys įrašomi į sistemą tuo atveju, jeigu grįžta nuo gerai atspindinčio paviršiaus. Tuo tarpu lazerio spindulys atsispindėjęs pavyzdžiui nuo pavienės medžio šakos ar tamsaus paviršiaus, neturi pakankamos intensyvumo reikšmės ir į sistemą nėra įrašomas. Intensyvumo riba gali būti koreguojama. Pilnos bangos duomenys yra kaupiami nepriklausomai nuo grįžtančio spindulio intensyvumo reikšmės (Melin, Shapiro ir Glover-Kapfer, 2017).

Diskretieji duomenys paprastai pateikiami LAS formatu. Svarbiausia informacija, apibūdinanti kiekvieną lazerio spindulį skirstoma į X, Y, Z, I, N, R ir C kategorijas. X, Y ir Z nusako lazerio taško atsispindėjimo padėtį trimatėje erdvėje, I – intensyvumo vertę, N – išspinduliuoto impulso grįžusių atsispindėjimų skaičių, R – atsispindėjimų skaičiaus eiliškumą, C – taško klasifikavimo kategoriją. Pagal 1.4 paveiksle pateiktą duomenų pavyzdį, galima nustatyti, jog pirmas impulsas turėjo tris atspindžius (N=3), pirmasis (R=1) ir antrasis (R=2) atsispindėjo nuo augalijos (C=3), trečiasis (R=3) liko nesuklasifikuotas (C=1). Tuo tarpu paskutinis impulsas turėjo du atspindžius (N=2), iš kurių pirmasis (R=1) atsispindėjo nuo augalijos (C=3), o likusi lazerio dalis (R=2), prasiskverbusi pro augmeniją, dar kartą atsispindėjo nuo žemės (C=2).

X	Y	Z	I	N	R	C
597847.589	7336016.990	329.020	1	3	1	3
597847.290	7336017.230	325.050	1	3	2	3
597846.979	7336017.490	320.780	1	3	3	1
597845.609	7336017.429	319.820	14	1	1	1
597842.969	7336017.230	319.330	18	1	1	2
597840.359	7336017.009	319.060	17	1	1	2
597838.520	7336016.200	328.500	8	1	1	1
597836.849	7336016.370	323.710	5	2	1	3
597836.469	7336016.660	318.960	0	2	2	2

1.4 pav. LiDAR duomenų pavyzdys

Daugiau nei kartą atsispindėjusio lazerio spindulio pavyzdys pateikiamas 1.5 paveiksle. Grįžtantiems lazerio impulsams, pasiekus imtuvą, išmatuojamas lazerio sklidimo laikas (angl. *time of flight*) ir nustatoma kiekvieno atsispindėjusio paviršiaus pozicija. Verta paminėti, kad paskutinis grįžtantis lazerio atspindys, nebūtinai visada bus atsispindėjęs nuo žemės, kadangi lazerio kelyje gali pasitaikyti kliūčių, pro kurias jis nebeprasiskverbs, pavyzdžiui storos medžių šakos, pastatai ir pan. (Lohani, 2015).

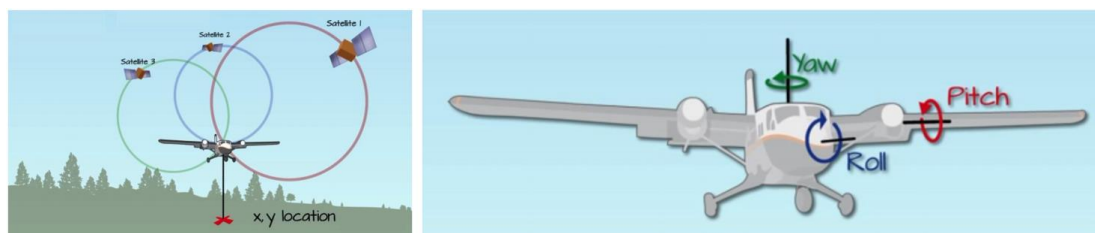


1.5 pav. Daugiau nei kartą atsispindėjusio lazerio pavyzdys (Lohani, 2015)

Po LiDAR sistemomis atlikto skenavimo gaunami trys duomenų rinkiniai (Vosselman ir Maas, 2010):

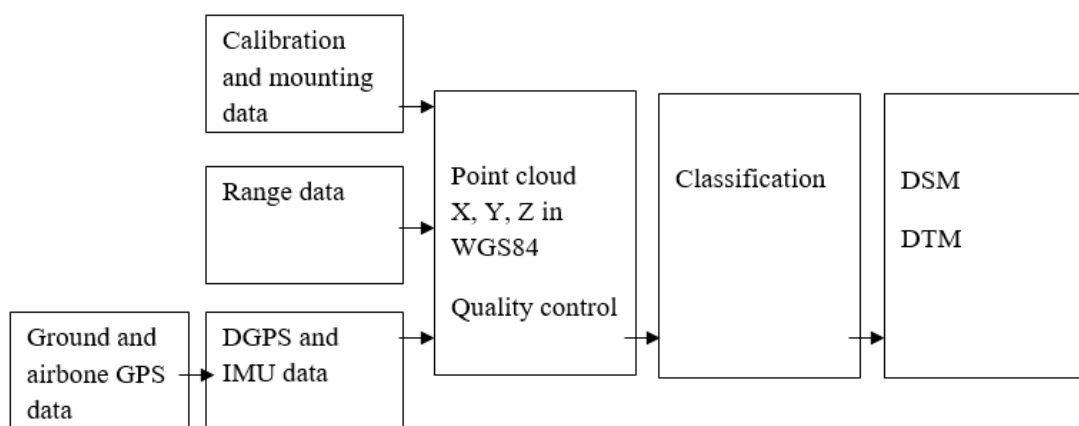
- GPS žemės stočių duomenys;
- navigaciniai duomenys (oro GPS ir IMU duomenys);
- LiDAR diapazono failas (angl. *range file*), kurį sudaro diapazono duomenys (angl. *ranging data*), amplitudės duomenys, skenerio parametrai (pvz. skenavimo kampas) ir grįžusių signalų skaičius (angl. *echo counts*). Šis diapazono failas yra vadinamieji žali LiDAR skenavimo duomenys.

IMU yra inercinių matavimų blokas tvirtinamas tiesiai prie skenerio arba ant stabilios matavimų platformos. Jis kaupia informaciją apie LiDAR sistemos judėjimo pagreitį ir sukimosi dažnį. Judėjimo pagreičio informacija naudojama matavimų platformos padėčiai nustatyti, o sukimosi dažnio informacija – platformos orientavimui nustatyti. 1.6 paveiksle vizualiai pateikiami GPS ir IMU kaupiami duomenys.



1.6 pav. GPS renkami duomenys (kairėje), IMU renkami duomenys (dešinėje), (Assi, 2016)

Duomenų apdorojimas išskiriamas į du etapus. Pirmame etape, naudojant antžeminių stočių GPS duomenis, yra pataisomi oro GPS matavimai. Tuomet išvestinis GPS duomenų rinkinys integruojamas su IMU duomenimis, kad būtų galima kuo tiksliau atkurti skrydžio linijas bei optimizuoti aukščio taškų ir padėties informaciją. Antrame duomenų apdorojimo etape laiko žymų pagalba skrydžio linijų informacija yra sujungiama su diapazono matavimų duomenimis. Šiame etape įvedamos matavimų pataisos – kalibravimo duomenys, atmosferos korekcijos, montavimo parametrai. Taip pat yra atliekamas koordinacių transformavimas. Po transformavimo gautos X, Y ir Z reikšmės yra vadinamos 3D taškų debesimi ir kaupiamos LAS formatu, atliekama jų kokybės kontrolė bei klasifikavimo procesas, generuojami DSM/DTM. Duomenų apdorojimo proceso schema pateikiama 1.7 paveiksle (Vosselman ir Maas, 2010).



1.7 pav. Oro LiDAR duomenų apdorojimo proceso schema (Vosselman ir Maas, 2010)

1.2. LAS duomenų formatas

Pirminis LiDAR duomenų formatas buvo ACSII (angl. *American Standard Code for Information Interchange*). Tačiau naudojant šį formatą buvo susiduriama su įvairiomis problemomis: lėtu duomenų skaitymu ir apdorojimu, naudingos informacijos praradimu, ACSII formatas neturėjo savo standarto, todėl kildavo įvairių duomenų perdavimo problemų. Siekiant išvengti šių nepatogumų Amerikos fotogrametrijos ir nuotolinių tyrimų bendruomenė (angl. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)*) pristatė dvejetainį LAS 1.0 formatą. Vėliau buvo išleisti šio formato patobulinimai: LAS 1.1, LAS 1.2, LAS 1.3. Galiausiai 2011 m. lapkričio 14d. išleistas LAS 1.4 formatas, kuris yra naudojamas iki šiol. Visų LAS formatų versijų specifikacijos yra pasiekiamos ASPRS tinklalapyje (Dong ir Chen, 2018).

LAS formato failuose yra kaupiami dvejetainiai duomenys, kurie susideda iš keturių dalių (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), 2019):

- duomenų antraštės bloko;
- kintamo ilgio įrašų;
- taškinių duomenų įrašų;

- išplėstinių kintamo ilgio įrašų.

Duomenų antraštės bloke pateikiama bendra informacija apie skenavimo duomenis: taškų numeriai, duomenų ribos, maksimalios/minimalios koordinacių reikšmės, failo generavimo programinė įranga, failo generavimo data, bet kokio skaičiaus kintamo ilgio įrašų kiekis pan. Antraštės bloko laukų informacija nėra privaloma, tačiau nenaudojami laukai turi būti užpildyti nuliu. Duomenų antraštės bloko struktūra pateikiama 1.8 paveiksle.

Item	Format	Size	Required
File Signature ("LASF")	char[4]	4 bytes	yes
File Source ID	unsigned short	2 bytes	yes
Global Encoding	unsigned short	2 bytes	yes
Project ID - GUID Data 1	unsigned long	4 bytes	
Project ID - GUID Data 2	unsigned short	2 bytes	
Project ID - GUID Data 3	unsigned short	2 bytes	
Project ID - GUID Data 4	unsigned char[8]	8 bytes	
Version Major	unsigned char	1 byte	yes
Version Minor	unsigned char	1 byte	yes
System Identifier	char[32]	32 bytes	yes
Generating Software	char[32]	32 bytes	yes
File Creation Day of Year	unsigned short	2 bytes	yes
File Creation Year	unsigned short	2 bytes	yes
Header Size	unsigned short	2 bytes	yes
Offset to Point Data	unsigned long	4 bytes	yes
Number of Variable Length Records	unsigned long	4 bytes	yes
Point Data Record Format	unsigned char	1 byte	yes
Point Data Record Length	unsigned short	2 bytes	yes
Legacy Number of Point Records	unsigned long	4 bytes	yes
Legacy Number of Point by Return	unsigned long[5]	20 bytes	yes
X Scale Factor	double	8 bytes	yes
Y Scale Factor	double	8 bytes	yes
Z Scale Factor	double	8 bytes	yes
X Offset	double	8 bytes	yes
Y Offset	double	8 bytes	yes
Z Offset	double	8 bytes	yes
Max X	double	8 bytes	yes
Max Y	double	8 bytes	yes
Max Z	double	8 bytes	yes
Min X	double	8 bytes	yes
Min Y	double	8 bytes	yes
Min Z	double	8 bytes	yes
Start of Waveform Data Packet Record	unsigned long long	8 bytes	yes
Start of First Extended Variable Length Record	unsigned long long	8 bytes	yes
Number of Extended Variable Length Records	unsigned long	4 bytes	yes
Number of Point Records	unsigned long long	8 bytes	yes
Number of Points by Return	unsigned long long[15]	120 bytes	yes

1.8 pav. Antraštės bloko struktūra (ASPRS, 2019)

Kintamo ilgio įrašuose pateikiami įvairūs duomenys, įskaitant informaciją apie projekciją, metaduomenis, bangos formos paketus ir vartotojo naudotų programų duomenis. Kintamo ilgio įrašų skaičius yra nurodomas antraštės bloko laukelyje „*Number of variable length records*“. Kiekvienam įrašui yra priskiriama 54 bitų ilgio antraštė. Kadangi šiuos įrašus gali pridėti daugiau nei vienas vartotojas, antraštėje turi būti nurodomas įrašą pridėjusio vartotojo ID. Vienas vartotojas gali pridėti ne daugiau kaip 65 535 kintamojo ilgio įrašus. Šių įrašų antraštės bloko struktūra pateikiama 1.9 paveiksle (ASPRS, 2019).

Item	Format	Size	Required
Reserved	unsigned short	2 bytes	
User ID	char[16]	16 bytes	yes
Record ID	unsigned short	2 bytes	yes
Record Length After Header	unsigned short	2 bytes	yes
Description	char[32]	32 bytes	

1.9 pav. Kintamo ilgio įrašo antraštės bloko struktūra (ASPRS, 2019)

Trečioje LAS failo dalyje kaupiami taškinių duomenų įrašai. Taškinių duomenų įrašų pradžios pozicija LAS faile, yra nurodoma duomenų antraštės bloko laukelyje „*Offset to point data*“. Priklausomai nuo taškinių duomenų išsamumo, duomenys gali būti 10 formatų. Nors LAS failai palaiko juos visus, 0–5 taškinių duomenų įrašų formatai (PDRF) yra laikomi pasenusiais, todėl rekomenduojama naudoti 6–10 formatus. Visi taškinių duomenų įrašai, esantys viename LAS faile turi būti to paties formato. 1.10 paveiksle pateikiama išsamiausiame, 10 formate kaupiama informacija apie taškinis duomenis (ASPRS, 2019).

Item	Format	Size	Required
X	long	4 bytes	yes
Y	long	4 bytes	yes
Z	long	4 bytes	yes
Intensity	unsigned short	2 bytes	no
Return Number	4 bits (bits 0-3)	4 bits	yes
Number of Returns (Given Pulse)	4 bits (bits 4-7)	4 bits	yes
Classification Flags	4 bits (bits 0-3)	4 bits	no
Scanner Channel	2 bits (bits 4-5)	2 bits	yes
Scan Direction Flag	1 bit (bit 6)	1 bit	yes
Edge of Flight Line	1 bit (bit 7)	1 bit	yes
Classification	unsigned char	1 byte	yes
User Data	unsigned char	1 byte	no
Scan Angle	short	2 bytes	yes
Point Source ID	unsigned short	2 bytes	yes
GPS Time	double	8 bytes	yes
Red	unsigned short	2 bytes	yes
Green	unsigned short	2 bytes	yes
Blue	unsigned short	2 bytes	yes
NIR	unsigned short	2 bytes	yes
Wave Packet Descriptor Index	unsigned char	1 byte	yes
Byte Offset to Waveform Data	unsigned long long	8 bytes	yes
Waveform Packet Size in Bytes	unsigned long	4 bytes	yes
Return Point Waveform Location	float	4 bytes	yes
Parametric dx	float	4 bytes	yes
Parametric dy	float	4 bytes	yes
Parametric dz	float	4 bytes	yes
<i>Minimum PDRF Size</i>		<i>67 bytes</i>	

1.10 pav. Taškinių duomenų įrašo formatai Nr. 10, (ASPRS, 2019)

Išplėstiniai kintamo ilgio įrašai iš esmės yra identiški paprastiems kintamo ilgio įrašams, tačiau yra pranašesni tuo, jog juos galima pridėti LAS failo pabaigoje, neperrašant viso failo. Taip pat įrašo ilgis po antraštės bloko yra 8 bitų ilgio, tai kai tuo tarpu paprasto kintamojo ilgio įrašas gali užimti tik 2 bitus. Išplėstinių kintamo ilgio įrašų skaičius nurodomas antraštės bloko laukelyje „*Number of extended variable length records*“. Kiekvienam išplėstinio kintamo ilgio įrašui priskiriamas antraštės blokas, kurio ilgis – 60 bitų. Antraštės bloko struktūra pateikiama 1.11 paveiksle.

Item	Format	Size	Required
Reserved	unsigned short	2 bytes	
User ID	char[16]	16 bytes	yes
Record ID	unsigned short	2 bytes	yes
Record Length After Header	unsigned long long	8 bytes	yes
Description	char[32]	32 bytes	

1.11 pav. Išplėstinio kintamo ilgio įrašo antraštės bloko struktūra (ASPRS, 2019)

1.3. Duomenų klasifikavimas

Nagrinėjant literatūrą, pastebėta, kad LiDAR taškų klasifikavimo metodų yra daug ir įvairių. Pagrindinis klasifikavimo uždavinys – atskirti žemės ir ne žemės taškus. Toliau klasifikuojamos kitos duomenų klasės. Žemės filtravimo metodai skirstomi į keturias grupes (Shan ir Toth, 2018):

- morfologiniai filtrai (angl. *morphological*);
- laipsniško tankinimo filtrai (angl. *progressive densification*);
- paviršiumi grįsti filtrai (angl. *surface-based*);
- segmentacija grįsti filtrai (angl. *segmentation-based*).

Morfologiniai filtrai yra pagrįsti matematine morfologija, kuri apima aibės teorija pagrįstas operacijas, skirtas duomenų savybėms iš vaizdo išgauti (Zhang et al., 2003). Dvejetainiams vaizdams padidinti arba sumažinti naudojamos išplėtimo arba *erozijos* operacijos (Zhang et al., 2003; Shan ir Toth, 2018). Dvejetainiai vaizdai – tai vaizdai sudaryti iš taškų, kurie gali būti dviejų spalvų, dažniausiai juodos arba baltos. Nagrinėjant literatūrą, buvo rasta nemažai šaltinių, kuriuose analizuojami įvairūs morfologinių filtrų variantai ir pritaikymas. Pingel, Clarke ir McBride (2013) pristato patobulintą paprastąjį morfologinį filtrą, kuriame naudojamas tiesiškai didėjantis langų ir nuolydžių slenksčio nustatymas, taip pat pateikiamas naujas dvejetainių vaizdų spalvinimo metodas. Wang ir kt. (2014), Zhang, Yan ir Chen (2006) savo darbuose aptaria progresyvųjį morfologinį filtrą. Hao, Zhen, Li ir Zhao (2019) analizuoja grafų teorija pagrįstą progresyvųjį morfologinį filtrą. Taip pat gausu šaltinių, kuriuose yra pristatomi morfologinio filtro patobulinimai. Ismail ir kt. (2015) pristato morfologinį filtrą, kuris yra patobulintas, remiantis erdvėje pasiskirsčiusia paviršiaus nuolydžio reikšme, taip pagerindami filtracijos rezultatus. Hui, Wu, Hu ir Ziggah (2017) pristato filtro patobulinimą, pagrįstą hierarchine radialinės bazės funkcijų interpoliacija, to rezultate, taip pat gaunami geresni filtravimo rezultatai įvairaus reljefo teritorijose. Hui, Hu, Yevenyo ir Yu (2016) pristato morfologinio filtro patobulinimą, pagrįstą kelių lygių Krigingo interpoliacija, taip pagerindami filtravimo rezultatus, ne tik lygaus, bet ir sudėtingo reljefo teritorijose.

Laipsniško tankinimo filtrai (PTD) yra pagrįsti iteraciniu TIN paviršiaus tankinimu, pakartotinai pridėdant papildomus taškus. Pirminis paviršius yra sugeneruojamas iš nedidelio kiekio žemiausią altitudę turinčių taškų. Likę taškai yra laipsniškai įtraukiami į paviršių. Kartotinis taškų įtraukimo procesas pagrįstas kiekvieno taško analize, pagal TIN paviršiaus trikampį, į kurį patenka analizuojamas taškas (Pérez-García, Delgado, Cardenal, Colomo ir Ureña, 2012; Shan ir Toth, 2018). Šis filtras taip pat turi įvairių variantų ir patobulinimų. Nie ir kt. (2017) pristatė patobulintą metodą su pakeistais pradiniais, klasikinio PTD metodo iteracinio vertinimo kriterijais, taip gaudami teisingesnius klasifikavimo rezultatus. Kang, Liu ir Lin (2014) PTD metodui pritaikė daugiabranduolinius skaičiavimo įrenginius, tokiu būdu pagreitindami filtravimo procesą. Sithole ir

Vosselman (2004) pristatė filtro patobulinimą, pagrįstą segmentacija ir slenksčio parametru, kuris yra adaptuojamas pagal reljefą. Patobulinimu siekta sumažinti rankiniu būdu įvedamo slenksčio parametro jautrumą ir gauti tikslesnius klasifikavimo rezultatus. Wang ir kt. (2020) savo darbe pristato patobulintą filtrą, pagrįstą daugiamasteline cilindrine taškų kaimynyste, to rezultate taip pat yra gaunami teisingesni klasifikavimo rezultatai, sudėtingo reljefo teritorijose. Zhao, Guo, Su ir Xue (2016) pristato patobulintą filtrą, sujungdami jį su morfologiniu filtru, siekdami tiksliau išskirti žemės taškus miškingose teritorijose.

Priešingai nei laipsniško tankinimo filtruose, kuriuose žemės paviršius yra tankinamas, pridodant naujus taškus, paviršiumi grįstuose filtruose pirmiausia daroma prielaida, kad visi taškai priklauso žemės paviršiui ir tuomet nesutampantys su paviršiumi taškai yra pašalinami (Shan ir Toth, 2018). Šių filtrų, pagrindinis principas yra sukurti parametrinį paviršių su atitinkama buferine zona, kuri 3D erdvėje apibrėžia sritį. Į šią sritį patenkantys taškai, tikėtina bus žemės taškai (Sithole ir Vosselman, 2004).

Taikant segmentacija pagrįstus metodus, yra daroma prielaida, kad objektų segmentai yra aukščiau už žemės segmentus. Šis procesas susideda iš dviejų etapų: pirmiausia atliekama segmentacija, o tuomet remiantis gautais segmentais atliekamas filtravimas (Lin ir Zhan, 2014). Shen, Liu, Lin ir Zhao (2012) savo darbe pristato filtro variantą, darydami prielaidą, kad žemės segmentai yra horizontalūs ir žemiau už kitų objektų segmentus. Naudojant šį metodą, buvo atlikti klasifikavimo bandymai ir gautas didesnis klasifikavimo tikslumas. Lohmann (2002) filtravimo procesui pritaikė segmentų kompaktiškumo parametą ir kaimyninių segmentų aukščių skirtumą, kad identifikuotų skirtingų tipų objektus. Tóvári ir Pfeifer (2005) pristatė segmentacijos metodą pagrįstą prielaida, jog ištisiniai ir lygūs paviršiai turi būti sugrupuoti į tuos pačius segmentus.

Taip pat pastaruoju metu yra nagrinėjamas LiDAR-DSM duomenų klasifikavimas taikant konvoliucinių neuroninių tinklų metodą (angl. *convolution neural networks (CNN)*). CNN – tai gilaus mokymosi metodas, kuris naudojant hierarchinius modelius, automatiškai išskiria nekintamas ir diskriminuotas LiDAR-DSM duomenų savybes, kurios lemia tikslią duomenų klasifikaciją (Wang, He, Ghamisi ir Chen, 2018). Pasak Xie ir Chen (2020) nors CNN metodas yra efektyvus LiDAR-DSM klasifikavimo užduotims spręsti, metodo matematinių architektūrų projektavimas reikalauja daug darbo. Savo straipsnyje autoriai pristato patobulintą CNN metodo automatinio modulio projektavimo strategiją, apibrėžiant tinklą pagal kelių pagrindinių statybinių elementų derinį. Kadangi CNN metodo pritaikymas klasifikavimo procese yra ganėtinai naujas, įvairius jo tobulinimus ir pritaikymo būdus pristato daug autorių. He, Wang, Ghamisi, Li ir Chen (2018) savo straipsnyje nagrinėja LiDAR duomenų klasifikavimą, naudojant CNN metodą kartu su erdvine transformacija. Zorzi, Maset, Fusiello ir Crosilla (2019) nagrinėja būtent pilnos bangos oro LiDAR duomenų klasifikavimą, naudojant CNN metodą. Jin ir kt. (2018) analizuoja klasifikavimą, naudojant CNN

metodą kartu su regioninio augimo algoritmu. Pan ir kt. (2020) LiDAR duomenų klasifikavimo tyrime naudoja CNN metodą su optimizuotais *hiper* parametrais.

Kitame skyriuje detaliau aptariami konkretūs klasifikavimo metodai, naudojami šiam tyrimui pasirinktose programose.

2. Programų veikimo principai

Darbe duomenims klasifikuoti naudojamos šios programos:

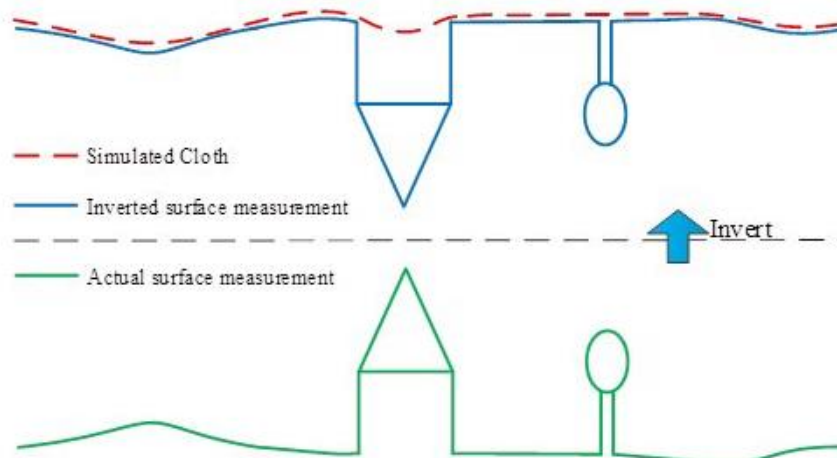
- *CloudCompare*;
- *Global Mapper*;
- *LasTools*.

2.1, 2.2 ir 2.3 poskyriuose aptariami programose naudojami klasifikavimo algoritmai, bei galimų klasifikavimo parametrų reikšmė.

2.1. CloudCompare programinės įrangos veikimo principas

Programoje galimas tik žemės ir ne žemės taškų išskyrimas. Detalesnė klasifikacija neatliekama. Programoje naudojamas žemės taškų išskyrimo metodas, pagrįstas audinio modeliavimu ir vadinamas *Cloth simulations filter (CSF)* (Weil, 1986). Audinio modeliavimo terminas yra siejamas su 3D kompiuterinės grafikos algoritmais ir yra naudojamas audinio imitavimo kompiuterinėje programoje procesui įvardinti (Zhang et al., 2016). Šį metodą priskiriamas paviršiumi grįstų metodų grupei.

Taikant šį metodą, LiDAR taškinis masyvas yra apverčiamas ir ant apversto paviršiaus, iš viršaus uždedamas audinys, kuris dėl savo svorio (priklausomai nuo standumo) padengia paviršių, įgaudamas skaitmeninio reljefo modelio (DTM) formą (2.1 pav.).

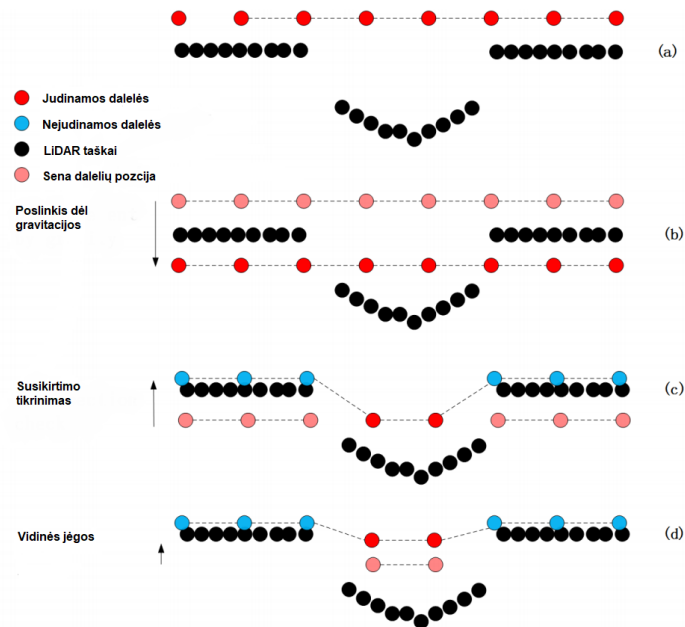


2.1 pav. Audinio modeliavimo principas: žalia spalva žymi išmatuotą paviršių, mėlyna spalva – apverstą paviršių, raudonas punktyras – sumodeliuotą audinį (Zhang et al., 2016)

Analizuojant audinio dalelių ir atitinkamų LiDAR taškų sąveiką, nustatoma galutinė audinio forma, kuri toliau naudojama kaip pagrindas. Žemės taškai yra išgaunami lyginant pradinius LiDAR taškus su sugeneruotu paviršiumi (Weil, 1986).

Taikant šį metodą LiDAR taškams filtruoti, audinio dalelių judėjimas yra galimas tik vertikalia kryptimi. Todėl dalelių susidūrimą galima nustatyti, lyginant dalelės ir reljefo aukščių vertes. Kai dalelė pasiekia reikiamą padėtį (žemės paviršių) ji pažymima kaip nejudinama. Jėgos veikiančios

daleles yra padalintos į išorines ir vidines. Šiame audinio modeliavimo metode išorinė jėga yra gravitacija. Pirmiausia apskaičiuojamas nuo gravitacijos atsiradęs dalelės poslinkis, toliau dalelės padėtis koreguojama pagal vidinių jėgų poveikį (Zhang et al., 2016). Proceso eiga pateikiama 2.2 paveiksle.



2.2 pav. CFS metodo etapai: a) Pradinė būsena: audinys uždedamas ant apverstų LiDAR taškų; b) Apskaičiuojamas audinio dalelių poslinkis, veikiant gravitacijai; c) Audinio dalelių susikirtimo su LiDAR taškais tikrinimas. Dalelės esančios žemiau už LiDAR taškus yra perkeltamos ant jų ir pažymimos kaip nejudinamos; d) Vidinių jėgų poveikis: judinamos dalelės juda veikiamos kaimyninių dalelių sukeltų jėgų (Zhang et al., 2016)

Programos parametrai, kuriuos gali nustatyti vartotojas išskiriami į dvi grupes: bendruosius ir išplėstinius.

Bendrieji parametrai (Cloudcompare, n.d.):

- Scenos tipas – status šlaitas (angl. *steep slope*), reljefas (angl. *relief*), plokščias paviršius (angl. *flat*). Atsižvelgiant į vartotojo pasirinktą taškinio debesies situacijos tipą, yra parenkamas modeliuojamo audinio standumas.
- Šlaito stulpelio apdorojimas atjungtai teritorijai (angl. *slope post processing for disconnected terrain*). Apdorojant duomenis, kuriuose yra stačių šlaitų, algoritmas gali padaryti grubių klaidų, kadangi modeliuojamas audinys gali būti generuojamas virš šlaitų ir ne visai tiksliai sutapti su tikroju žemės paviršiumi. Pasirinkus šią opcija, problema išsprendžiama.

Išplėstiniai parametrai (Cloudcompare, n.d.):

- Audinio skiriamoji geba (angl. *cloth resolution*) – matavimo vienetai tokie patys kaip ir taškų masyvo. Kuo didesnė audinio skiriamoji geba, tuo grubesnis gaunamas DTM.

- Maksimalus pakartojimų skaičius (angl. *max iterations*) – maksimalus paviršiaus modelio modeliavimo iteracijų skaičius (įprastai užtenka 500).
- Klasifikavimo slenkstis (angl. *classification threshold*) – riba, ties kuria taškai išskiriami į žemės ir ne žemės klases, atsižvelgiant į atstumą nuo taškų iki sumodeliuoto paviršiaus. Matavimo vienetai tokie pat, kaip ir taškų masyvo

2.2. Global Mapper programinės įrangos veikimo principas

Global Mapper programoje galimas žemės ir ne žemės taškų automatinis klasifikavimas ir detalesnis ne žemės taškų klasifikavimas į pastatų, augmenijos ir elektros konstrukcijų klases. Žemės taškų klasifikavimas susideda iš dviejų dalių: pirmiausia pašalinami taškai, kurie greičiausiai nėra žemės paviršiaus taškai, tuomet likę taškai yra lyginami su sumodeliuotu 3D žemės paviršiumi (Bluemarblegeo, n.d. a). Žemės taškams klasifikuoti naudojamas *Multiscale curvature classification* (MCC) algoritmas (Bluemarblegeo, 2019). Taikant šį algoritmą užtenka, kad įvesties duomenys turėtų X, Y ir Z koordinates. Pirmiausia kiekvienam LiDAR taškui apibrėžiamas vektorius $Z(s)$, kurį sudaro X ir Y koordinatės bei aukštis Z. Naudojant vektorių $Z(s)$, TPS (angl. *thin-plate spline*) metodu suinterpoliuojamas rastrinis paviršius. Rastro ląstelės rezoliucija apibrėžiama parametru λ , o kreivumo tolerancija parametru t . Suinterpoliavus pirminį paviršių yra apibrėžiamas naujas vektorius $X(s)$, sutampantis su $Z(s)$ ir susidedantis iš X bei Y koordinatės ir aukščio reikšmės gautos iš suinterpoliuoto rastrinio paviršiaus ląstelės. Tuomet skaičiuojamas kreivumo parametras, mastelio srityje l , pagal formulę (Evans ir Hudak, 2007):

$$c = x(s) + t, \quad (1)$$

kur $x(s)$ – vidutinio aukščio vektorius sutampantis su $Z(s)$ mastelio srityje l ; t – kreivumo tolerancijos parametras mastelio srityje l .

LiDAR taškai klasifikuojami į žemės ir ne žemės klases pagal sąlygą „Jeigu $Z(s) > c$, tada taškas ne žemės“, kur c yra kreivumo parametras mastelio srityje l , vektorius $Z(s)$ – išmatuotas LiDAR aukštis. Galiausiai patikrinama konvergencijos riba j ir jeigu ji yra nepasiekta, modelio skaičiavimai yra kartojami, priešingu atveju skaičiavimai pradedami iš naujo nuo kitos mastelio sritys. Mastelio sritys yra trys ($l = 1 - 3$), kiekvienoje jų skiriasi ląstelės rezoliucijos parametras: pirmoje mastelio skalėje naudojamas 0.5λ , antroje λ , trečioje 1.5λ (Evans ir Hudak, 2007).

Galimi šie žemės paviršiaus klasifikavimo parametrai (Bluemarblegeo, n.d. a):

- Bazinis dėžutės dydis, kreivumo nuokrypiui tikrinti (angl. *base bin size to check for curvature deviations*) – apibrėžia teritorijos dydį, kurioje duomenų taškas lyginamas su gretimais taškais. Vertė gali būti nustatoma metrais arba paskaičiuojama pagal vidutinį atstumą tarp duomenų taškų.

- Minimalus ne žemės taškų aukščio nukrypimas nuo vietinio vidurkio (angl. *minimum height departure from local mean*) – nurodomas leistinas aukščio pokytis, lyginant su vietiniu vidurkiu. Jį viršijantys taškai yra pašalinami iš žemės klasifikavimo. Mažos parametro vertės pašalina žemą augmeniją, kai duomenys yra tankesni, didesnės 1–3 m vertės, naudojamos mažesnio tankumo duomenims apdoroti, kai taškų tankis yra 2 ar mažiau taškų kvadratiniam metre. Numatytoji reikšmė yra 0,3 m ir yra tinkama vidutinio tankumo duomenims apdoroti.
- Maksimalus aukščio skirtumas (angl. *maximum height delta*) – nurodomas didžiausias galimas žemės altitudės pokytis. Šis parametras padeda atmesti akivaizdžiai gruntui nepriklausančius taškus (pastatus ir pan.).
- Tikėtinas reljefo nuolydis (angl. *expected terrain slope*) – nurodomas numatomas reljefo nuolydis laipsniais. Taškų masyvo regionai, kuriuose aptinkami vientisi, tačiau statesni nei nurodyta parametro vertė paviršiai (pastatų stogai, sienos), pašalinami iš žemės klasifikacijos. Numatytoji 7,5° vertė taikoma lygioms vietovėms, be didelių pylimų.
- Maksimalus pastato plotis (angl. *maximum building width*) – nurodoma, maksimali pastato pločio vertė metrais. Parametras skirtas pašalinti didelių pastatų stogus iš žemės klasifikacijos.

Atskyrus žemės ir ne žemės taškus, pastarieji toliau gali būti klasifikuojami dviem metodais – segmentacijos (angl. *segmentation method*) ir tinklelio (angl. *gridded method*). Tinklelio metodas gali būti naudojamas tik iš oro gautiems LiDAR duomenims klasifikuoti. Segmentacijos metodas yra universalesnis ir palaiko įvairių tipų duomenis: oro ir antžeminio LiDAR taškinius duomenis, bepiločių orlaivių (UAV) LiDAR taškinius duomenis, taškų masyvus sugeneruotus iš nuotraukų, naudojant fotogrametrinį metodą (Bluemarblegeo, n.d. b). Šiame darbe, dėl metodo universalumo, ne žemės taškai yra klasifikuojami segmentacijos metodu.

Segmentacijos metodu apdorojami taškų masyvai pirmiausia yra suskaidomi į segmentus, pagal pirminę apibendrintą informaciją (pvz.: homogeniniai pastato segmentai) ir toliau analizuojami greičiau nei individualūs taškai (Filin ir Pfeifer, 2006). Kiekviename segmente esantys taškai turi tas pačias savybes (Nguyen ir Le, 2013). Segmentacija gali būti atliekama tiesiogiai objekto erdvėje arba naudojant regiono augimo (angl. *region-growing*) technikas. Dažnai, homogeniškumo kriterijui formuluoti, naudojamas įprastas vektorius arba jo kitimas. Pirmuoju atveju gaunamas plokščias paviršius, o antruoju – tolygiai besikeičiantis paviršius. Taip pat homogeniškumas gali būti formuluojamas atsižvelgiant tik į aukštį arba aukščio pokytį. Priešingai, nei regiono augimo technikoje, segmentacija gali būti atliekama objekto erdvėje, ko pranašumas yra tai, kad prieš nustatant objektų grupes jau yra žinomas objektų kintamumas (Shan ir Toth, 2018).

Ne žemės taškų klasifikavimo parametrų nustatymai (Bluemarblegeo, n.d. b):

- Minimalus aukštis virš žemės (angl. *minimum height above ground*) – parametras skirtas siekiant sumažinti klasifikavimo klaidas, atmetant ant žemės esančius nereikalingus objektus: mašinas, kapitalines tvoras, žemą augmeniją ir pan. Reikšmė įvedama metrais.
- Kaimynystės diapazonas (angl. *neighborhood range*) – parametras skirtas apibrėžti diapazoną aplink tašką, į kurį patenkantys duomenys bus vertinami ir nustatomos vietinės paviršiaus savybės. Pavyzdžiui norint, kad programa teisingai suklasifikuotų pastatų stogus, kaimynystės diapazonas turi būti pakankamai didelis, kad į jį patenkantys taškai, aiškiai apibrėžtų stogo plokštumą. Šio parametro reikšmė labai priklauso nuo analizuojamų duomenų tankumo. Jeigu duomenys yra retesni, diapazonas turėtų būti parenkamas maždaug viso pastato stogo plokštumos dydžio, jeigu duomenys tankesni – diapazonas gali būti mažesnių stogo plokštumų, kurias galima vizualiai aptikti, dydžio. Parametro reikšmė įvedama metrais.
- Maksimalus kaimyninių taškų skaičius (angl. *maximum number of neighbors*) – parametras skirtas apibrėžti maksimalų kaimyninių taškų, patenkančių į vieną kaimynystės diapazoną, skaičių. Naudojamas kai analizuojamų taškų masyvas yra labai tankus ir į kaimynystės diapazoną patenkančių taškų tankis yra labai didelis.
- Minimalus kaimyninių taškų skaičius (angl. *minimum number of neighbors*) – parametras skirtas apibrėžti minimalų kaimyninių taškų, patenkančių į vieną kaimynystės diapazoną skaičių. Taškų diapazonai, į kuriuos patenkančių kaimyninių taškų skaičius atitinka šį parametą, klasifikacijos procese nedalyvauja. Kadangi iš kelių taškų statistikos teisingai apibrėžti paviršiaus savybes yra beveik neįmanoma, tokiu būdu yra išvengiama klasifikavimo klaidų.
- Mažiausias sankaupos dydis (angl. *minimum cluster size*) – parametras, kuris nurodo mažiausią greta vienas kito esančių taškų skaičių, reikalingą tai sankaupai suklasifikuoti. Pavyzdžiui trijų taškų sankaupa, statistiškai identifikuotų kaip pastato plokštuma, greičiausiai bus klaidingai suklasifikuota ir pastato toje vietoje iš tikrųjų nebus, tačiau jei vienoje sankaupoje bus 10 tokių taškų, tikėtina, kad toje vietoje pastatas tikrai yra.

2.3. LasTools programinės įrangos veikimo principas

LasTools yra programinės įrangos paketas, skirtas LAS formato LiDAR duomenims apdoroti.

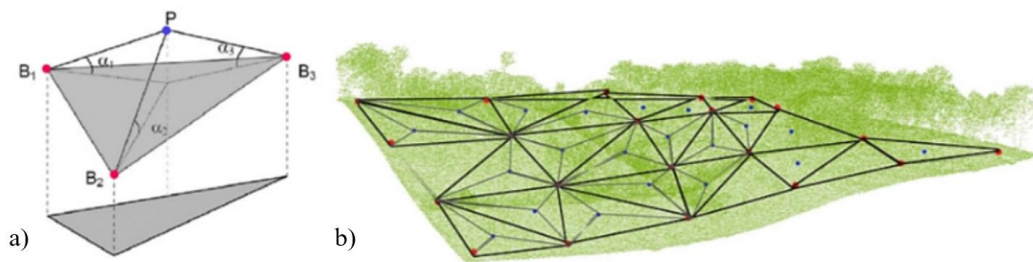
Paketą sudaro šie įrankiai:

- *LASview.exe* – skirta LiDAR duomenims LAS, LAZ, ASCII formatais peržiūrėti;
- *LASinfo.exe* – skirtas pateikti ataskaitą, apie LAS failo turinį;
- *LASsground.exe* – skirtas išfiltruoti ir suklasifikuoti visus žemės paviršiaus taškus;

- *LASoverlap.exe* – skirtas tikrinti persidengimą ir vertikalų/horizontalų skrydžio linijų išlyginimą;
- *LASclassify.exe* – skirtas suklasifikuoti pastatų ir augmenijos taškus, esančius virš žemės paviršiaus;
- *LASgrid.exe* – skirtas generuoti aukščio arba intensyvumo tinklelius (rastrus), labai dideliems LAS failams;
- *LASboundary.exe* – skirtas išskirti duomenų ribų poligoną;
- *LASheight.exe* – skirtas suskaičiuoti visų taškų aukštį virš žemės paviršiaus;
- *LASstitle.exe* – skirtas sudalinti didelius LAS taškų kiekius į pasirinkto dydžio lapus;
- *LASzip.exe* – skirtas suglaudinti LAS failus, išsaugant jų kokybę;
- *LASindex.exe* – skirtas sukurti erdvinio indekso LAS failą, greitoms erdvinėms užklausoms;
- *txt2las.exe* – skirtas konvertuoti tekstinį ASCII duomenų formatą į skaitmeninį LAS formatą;
- *las2txt.exe* – skirtas konvertuoti skaitmeninį LAS formatą į tekstinį ASCII formatą;
- *LASmerge.exe* – skirtas sujungti kelis LAS failus į vieną;
- *LASsplit.exe* – skirtas padalinti vieną ar kelis LAS failus į skrydžio linijų failus;
- *LASsort.exe* – skirtas išrūšiuoti taškus pagal GPS laiką, taškų šaltinį arba erdvinį artumą;
- *LASvalidate.exe* – skirtas nustatyti LAS failai atitinka ASPRS LAS 1.0–1.4 specifikacijas;

Duomenų klasifikavimą *LasTools* programa sudaro trys etapai. Pirmiausia su *LASground* įrankiu yra išskiriami žemės taškai, tuomet su *LASheight* įrankiu paskaičiuojamas kiekvieno ne žemės taško aukštis virš žemės paviršiaus ir galiausiai su *LASclassify* įrankiu suklasifikuojami ne žemės taškai.

LASground veikimo principas pagrįstas žemės taškų išgavimu iš bendro taškų masyvo, bei jų suklasifikavimu į žemės (class = 2) ir ne žemės taškus (class = 1). Šis įrankis puikiai veikia su natūraliais gamtiniais objektais – kalnais, miškais, laukais, kalvotomis teritorijomis, taip pat su urbanizuotomis teritorijomis. Pažymėtina, kad šis įrankis yra pritaikytas dirbti su iš oro gautais LiDAR duomenimis. Programoje naudojamas laipsniškas TIN tankinimo metodas (angl. *progressive TIN densification*). Šis metodas yra pagrįstas laipsnišku žemės paviršiaus tankinimu naujai suklasifikuotais žemės taškais. Pradinis žemės paviršiaus modelis yra sugeneruojamas iš taškų su žemiausia altitute, naudojant TIN trianguliacija. Toliau iš kiekvieno TIN paviršiaus trikampio yra išvedama vertikali prizmė ir joje esančių taškų priskiriamas nagrinėjamam trikampiui. Toliau analizuojami naujai priskirtų taškų poslinkiai nuo analizuojamo trikampio paviršiaus. Šie poslinkiai yra kampai α_1 , α_2 , α_3 tarp trikampio plokštumos ir linijų išvestų iš kiekvieno trikampio kampo į priskirtą tašką (2.3 pav.) (Shan ir Toth, 2018).



2.3 pav. a) Trikampiai priskirto taško poslinkio analizavimas. α_i – kampai tarp trikampio plokštumos ir linijų, išvestų iš kiekvieno trikampio kampo B_i į priskirtą tašką P; b) TIN paviršiaus sutankinimas naujais taškais. Raudoni taškai žymi pradinio TIN paviršiaus viršūnes, mėlyni – papildomus tankinimo tašku (ISPRS, n.d.)

Jeigu analizuojamo taško poslinkis yra mažesnis už ribinę vertę, jis priskiriamas žemes klasei ir pradedamas analizuoti kitas trikampis. Išanalizavus visus trikampius, paviršius yra sutankinamas naujai pridėtais taškais ir vėl pradedami tie patys skaičiavimai. Algoritmas sustabdomas, jeigu į trikampius nepatenka nei vienas taškas, pasiekiamas reikalingas žemės taškų tankumas arba visi naujai pridėti taškai yra arčiau paviršiaus nei nustatyta ribinė vertė (Shan ir Toth, 2018).

LASground algoritme įvedami keturi parametrai, kurie kontroliuoja filtravimo rezultatus (Rapidlasso, n.d. a):

- žingsnis (angl. *step*) – duomenų analizavimo žingsnis (matavimo vienetai metrai);
- smailė (angl. *spike*) – vertė, apibrėžianti atstumą, per kurį TIN paviršiuje „nušokę“ taškai bus pašalinti. Šalinami taškai, kurie į viršų nutolę nustatytu atstumu (pvz. 0,5 m), o į apačią – 10 kartų didesniu atstumu (atitinkamai 5 m);
- poslinkis (angl. *offset*) – maksimalus poslinkis metrais, nuo dabartinio žemės paviršiaus, į kurį patenkantys taškai naudojami kitam paviršiui sutankinti;
- standartinis nuokrypis (angl. *standart deviation*) – parametras apibrėžiantis plokštuminių lopų maksimalų standartinį nuokrypį centimetrais.

LASclassify įrankis klasifikuoja pastatus ir aukštą augaliją (medžius). Prieš naudojant šį klasifikatorių, žemės paviršiaus taškų klasė jau turi būti išskirta su *LASground* įrankiu, taip pat turi būti žinomas kiekvieno taško aukštis virš žemės paviršiaus, paskaičiuotas *LASheight* įrankiu. Klasifikavimo algoritmas pagrįstas suradimu galinčių sudaryti regionus kaimyninių taškų, nutolusių mažiausiai per 2 metrus virš žemės paviršiaus. Taškai, patenkantys į regionus, skirstomi į stogus (*planar* = 0,1) ir medžius (*rugged* = 0,4). Ribos, iki kurios taškai yra laikomi patenkančiais į tą pačią plokštumą pagal numatytuosius parametrus, yra 0,1 m. Naudojant šį įrankį kvadratiniam metre turi būti bent du lazerio taškai. Tai yra minimali reikšmė, stogų plokštumoms aptikti. Jei duomenys yra retesni, turi būti padidintas žingsnis, kuriame bus ieškomos plokštumos. Pagal nutylėjimą numatytasis žingsnis yra 2 x 2 m (Rapidlasso, n.d. b).

3. Pradiniai duomenys

Darbe nagrinėjamos teritorijos plotas – 1 km² (3.1 pav.). Teritorijos erdviniai skaitmeniniai lazerinio skenavimo duomenys atsiųsti iš geoportalo. Duomenų rinkinį sudaro 39 431 354 taškai. Duomenys pateikti LAS formatu. Remiantis duomenų paketo metaduomenimis, taškų tankis didesnis nei 30 (vid. 45) tšk. / kv. m. Horizontaliosios padėties nustatymo tikslumas RMSE < 30 cm, vertikalios padėties RMSE <10 cm. Taškams priskirtos RGB reikšmės. Duomenys klasifikuoti. Pirminis duomenų apdorojimas ir klasifikavimas atliktas *TerraScan* programa. Teritorijos aprėpties ribos: X_{min} = 557 000, X_{max} = 55 800, Y_{min} = 6 055 000, Y_{max} = 6 056 000, Z_{min} = 151,36, Z_{max} = 267,69. Taškų kiekis pagal lazerio grįžimų skaičių: pirmojo grįžimo – 32 489 623, antrojo – 6 011 997, trečiojo – 929 734. Skenavimo kampo režis nuo –42 iki 43 laipsnių. Duomenys suklasifikuoti į šias klases:

- žemės (5 932 183);
- žemos augmenijos (1 552 896);
- vidutinės augmenijos (706 792);
- aukštos augmenijos (10 008 242);
- pastatų (244 418);
- triukšmo (1 645);
- vandens (89);
- dalinio sutapimo (20 980 299);
- elektros konstrukcijų (5 790).

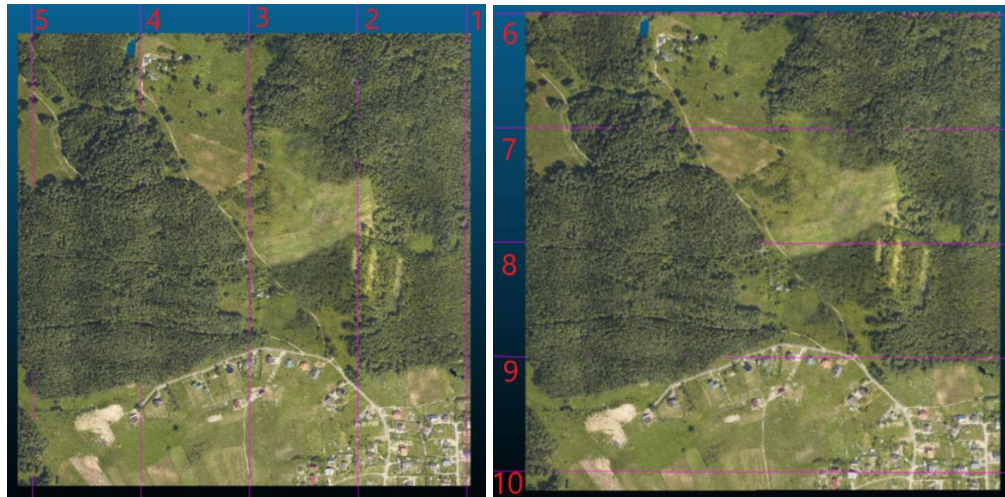


3.1 pav. Pradinių duomenų paketas

Kadangi turimi pradiniai duomenys yra jau suklasifikuoti, pirmiausia atliktas jų perklasifikavimas į nulinę (neklasifikuotų taškų) klasę, paruošiant juos tolimesniems klasifikavimo darbams su *CloudCompare*, *Global Mapper* ir *LasTools* programomis.

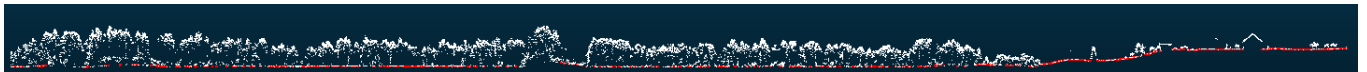
Klasifikavimo rezultatų tikslumo tyrimas, bus atliekamas lyginant kiekvieną naujai suklasifikuotą klasę su atitinkama pradinį duomenų klase, todėl siekiant gauti patikimus tyrimo rezultatus, vizualiai patikrintos aktualios pradinį duomenų klasės: žemės, aukštos augmenijos, pastatų ir elektros konstrukcijų.

Žemės klasė tikrinta sugretinus ją su išsamiais pradiniais duomenimis ir sugeneravus kontrolinius pjūvius. Pjūviai generuoti 0,5 m storio, kas 240 m. Pjūvių pozicijos pateikiamos 3.2 paveiksle.

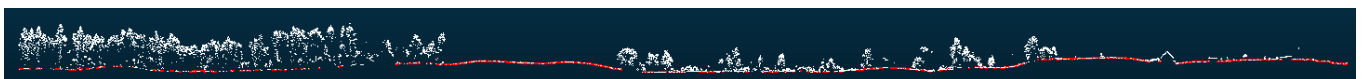


3.2 pav. Tikrinimo pjūvių pozicijos

Kontroliniai pjūviai pateikiami 3.3–3.12 paveiksluose. Raudona spalva žymi pradinį duomenų žemės klasę, balta – išsamius pradinius duomenis. Nagrinėjant pjūvius grubių, pradinį duomenų žemės klasės klasifikavimo klaidų neaptikta.



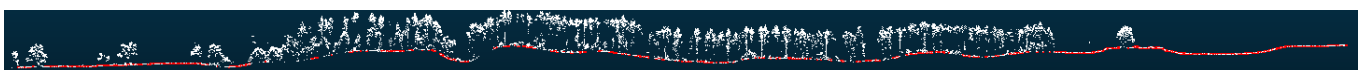
3.3 pav. Pradinį žemės klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 1



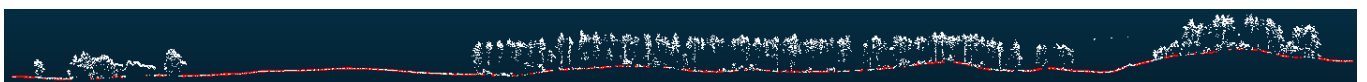
3.4 pav. Pradinį žemės klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 2



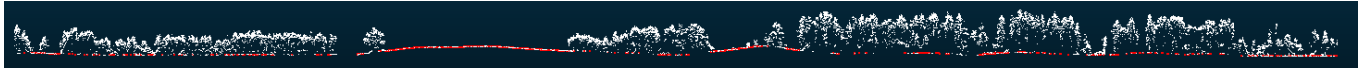
3.5 pav. Pradinį žemės klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 3



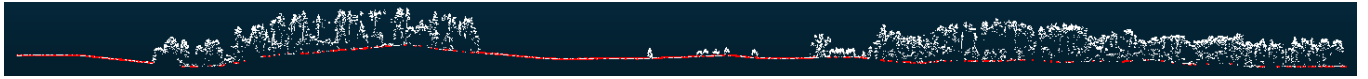
3.6 pav. Pradinį žemės klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 4



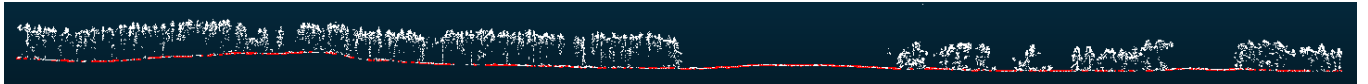
3.7 pav. Pradinį žemės klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 5



3.8 pav. Pradinių žemės klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 6



3.9 pav. Pradinių žemės klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 7



3.10 pav. Pradinių žemės klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 8

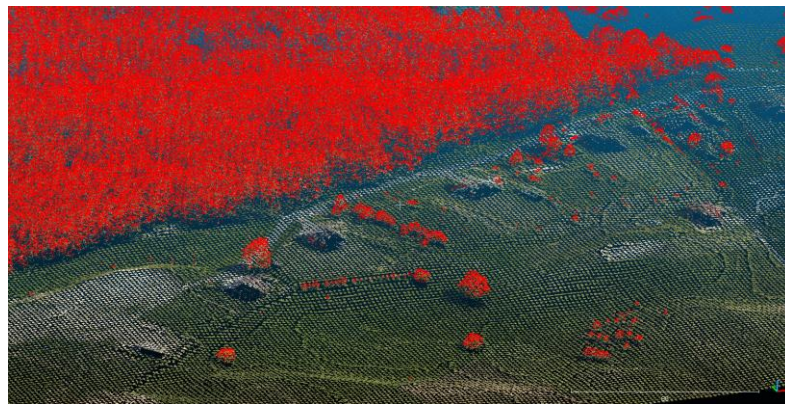


3.11 pav. Pradinių žemės klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 9

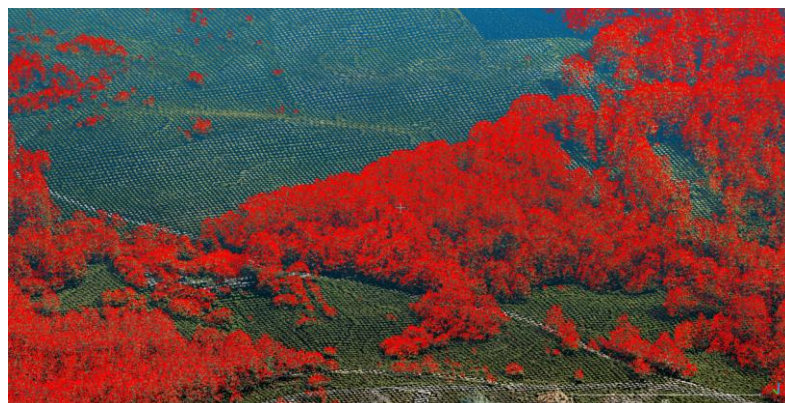


3.12 pav. Pradinių žemės klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 10

Augmenijos klasė tikrinta vizualiai, 3D režime, išskyrus ją raudona spalva ir sugretinus su išsamiais pilnais duomenimis. Tikrinimo 3D režime fragmentai pateikiami 3.13 ir 3.14 paveiksluose.

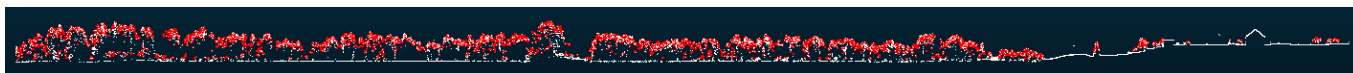


3.13 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo fragmentas

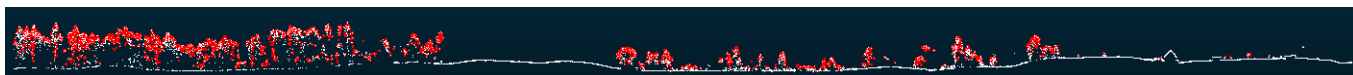


3.14 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo fragmentas

Taip pat buvo sugeneruoti kontroliniai pjūviai, pateikiami 3.15–3.24 paveiksluose. Raudona spalva žymi pradinių duomenų augmenijos klasę, balta – išsamius pradinius duomenis. Tiek tikrinant duomenis 3D režime, tiek nagrinėjant kontrolinius pjūvius grubių, pradinių duomenų augmenijos klasės klasifikavimo klaidų neaptikta.



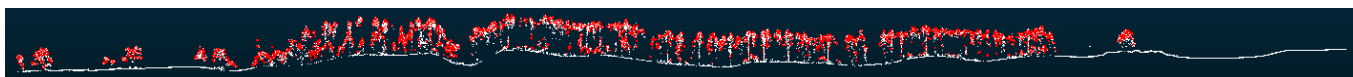
3.15 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 1



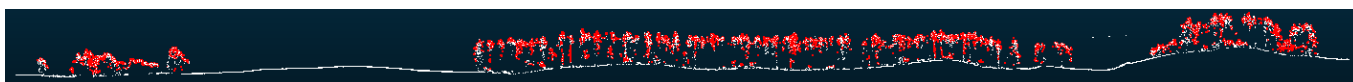
3.16 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 2



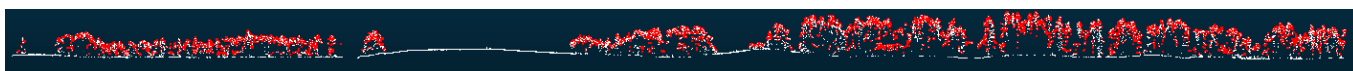
3.17 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 3



3.18 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 4



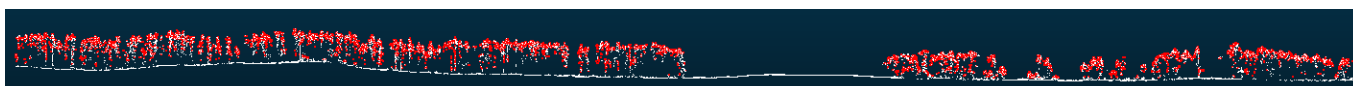
3.19 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 5



3.20 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 6



3.21 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 7



3.22 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 8



3.23 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 9

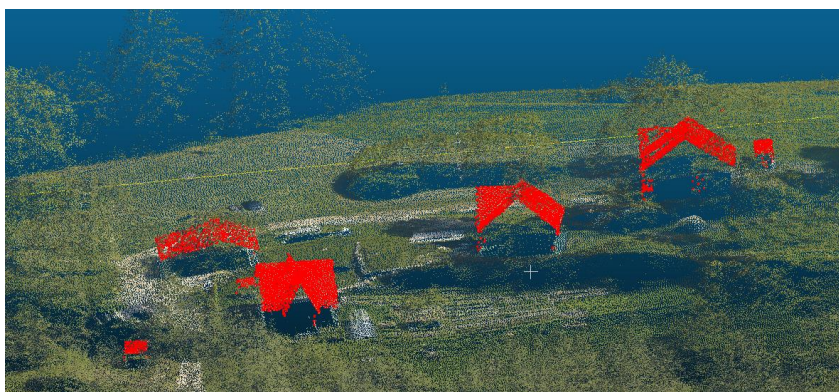


3.24 pav. Pradinių augmenijos klasės duomenų tikrinimo pjūvis Nr. 10

Pastatų klasė tikrinta vizualiai, 3D režime, išskyrus ją raudona spalva ir sugretinus su išsamiais pradiniais duomenimis. Tikrinimo fragmentai pateikiami 3.25–3.26 paveiksluose. Grubių, pradinių duomenų pastatų klasės klasifikavimo klaidų neaptikta.



3.25 pav. Pradinių pastatų klasės duomenų tikrinimo fragmentas



3.26 pav. Pradinių pastatų klasės duomenų tikrinimo fragmentas

Elektros klasė taip pat tikrinta vizualiai, 3D režime, išskyrus ją raudona spalva ir sugretinus su išsamiais pradiniais duomenimis. Tikrinimo fragmentas pateikiamas 3.27 paveiksle. Grubių, pradinių duomenų elektros klasės klasifikavimo klaidų neaptikta.

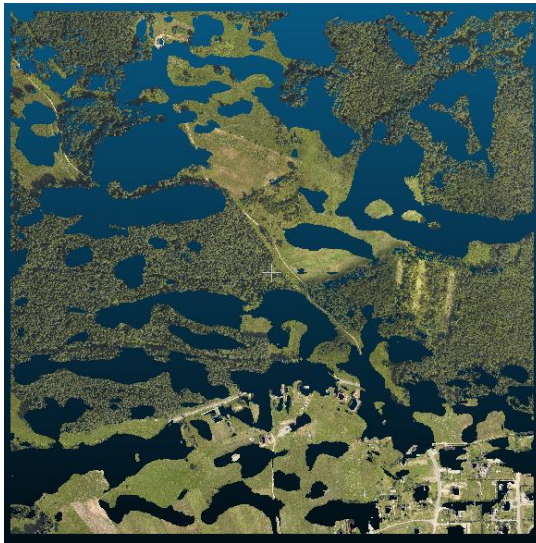


3.27 pav. Pradinių elektros klasės duomenų tikrinimo fragmentas

4. Duomenų klasifikavimas

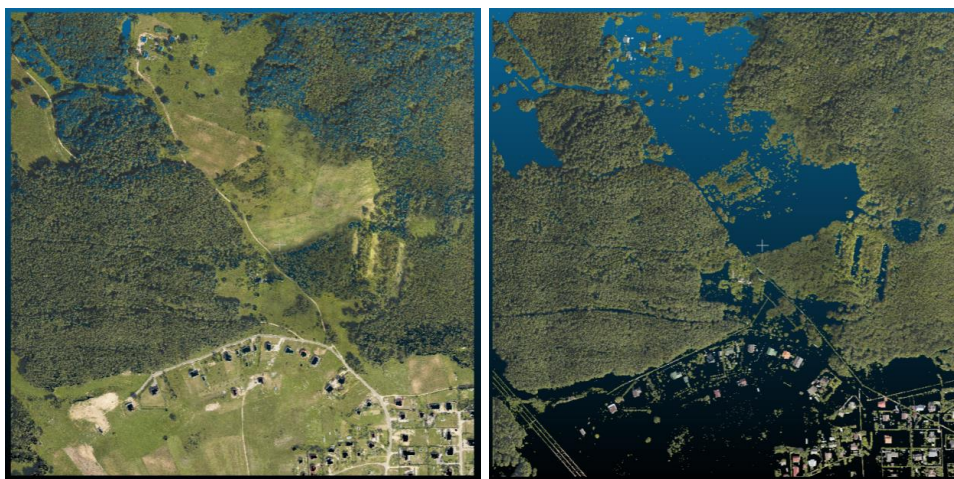
4.1. Klasifikavimas CloudCompare programa

Taškams klasifikuoti *CloudCompare* programoje naudojamas CSF papildinys. Klasifikavimo metu išskirtos dvi duomenų klasės: žemės ir ne žemės taškų. Detalesnė klasifikacija programoje neatliekama. Pirmiausia duomenys suklasifikuoti pagal numatytus parametrus: scenos tipas (angl. *scene*) – reljefas, audinio skiriamoji geba (angl. *cloth resolution*) – 2 m, maksimalus iteracijų skaičius (angl. *max iterations*) – 500, klasifikavimo slenkstis (angl. *classification threshold*) – 0,5 m. Gauta žemės taškų klasė pateikiama 4.1 paveiksle. Gauti klasifikavimo rezultatai yra neteisingi, palikta daug tuščių tarpų, prarasta žemės paviršiaus informacija.



4.1 pav. Žemės klasė su klasifikuota pagal numatytus parametrus

Atlikus kelis bandymus parinkti tinkamiausi klasifikavimo parametrai: scenos tipas – reljefas, audinio skiriamoji geba – 1 m, maksimalus iteracijų skaičius – 800, klasifikavimo slenkstis – 1 m. Gauta žemės taškų klasė pateikiama 4.2 paveikslo kairėje. Pažymėtina, kad taškų masyvo taškams RGB spalvos priskirtos iš aerofotonuotraukų, todėl žemės klasėje esantys miško žemės taškai yra medžių lapijos spalvos, dėl to gali atrodyti, kad Žemės klasei priskirti ir medžių klasės taškai. Žemės klasę sudaro 16 942 028 taškai. Ne žemės taškų klasė pateikiama 4.2 paveikslo dešinėje. Ją sudaro 22 489 326 taškai. Klasifikavimo proceso trukmė 4 min.



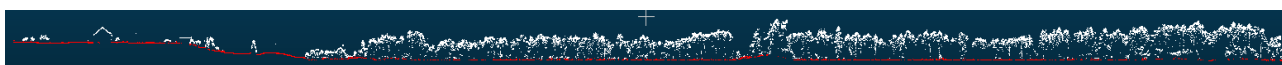
4.2 pav. *CloudCompare* klasifikavimo rezultatai: žemės taškų klasė (kairėje), ne žemės taškų klasė (dešinėje)

Žemės taškų klasifikavimo nedetaliai kontrolei atlikti, žemės taškai buvo sugretinti su išsamiais pradiniais duomenimis ir sugeneruoti išilginiai ir skersiniai pjūviai. Pjūviai sugeneruoti penkiose vietose, kas 240 m. Pjūvio plotis 0,5 m. Žemiau pateiktos išilginių ir skersinių kontrolinių pjūvių pozicijos (4.3 pav.). Iš viso gauta 10 kontrolinių pjūvių.



4.3 pav. Kontrolinių pjūvių pozicijos: išilginiai pjūviai (kairėje), skersiniai pjūviai (dešinėje)

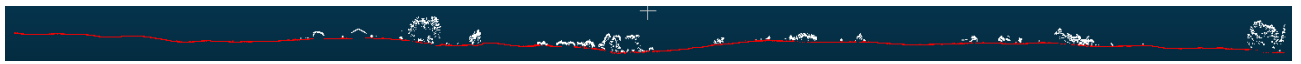
Pjūvių profiliai pateikti 4.4–4.13 paveiksluose. Balta spalva žymi išsamius pradinius duomenis, raudona – *CloudCompare* suklasifikuotus žemės taškus. Tikrinant pjūvius, grubių klasifikavimo klaidų neaptikta.



4.4 pav. Išilginis pjūvis Nr. 1



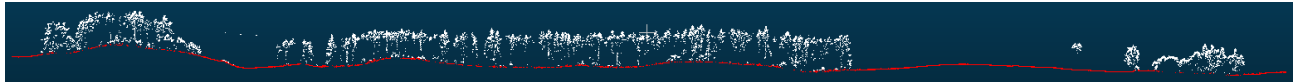
4.5 pav. Išilginis pjūvis Nr. 2



4.6 pav. Išilginis pjūvis Nr. 3



4.7 pav. Išilginis pjūvis Nr. 4



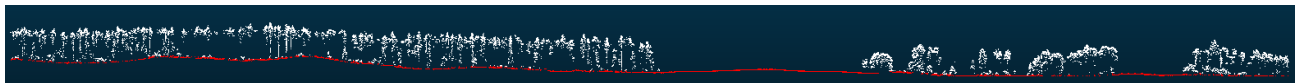
4.8 pav. Išilginis pjūvis Nr. 5



4.9 pav. Skersinis pjūvis Nr. 6



4.10 pav. Skersinis pjūvis Nr. 7



4.11 pav. Skersinis pjūvis Nr. 8



4.12 pav. Skersinis pjūvis Nr. 9



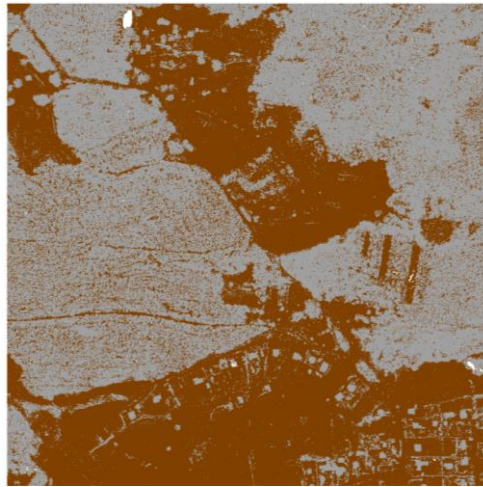
4.13 pav. Skersinis pjūvis Nr. 10

4.2. Klasifikavimas Global Mapper programa

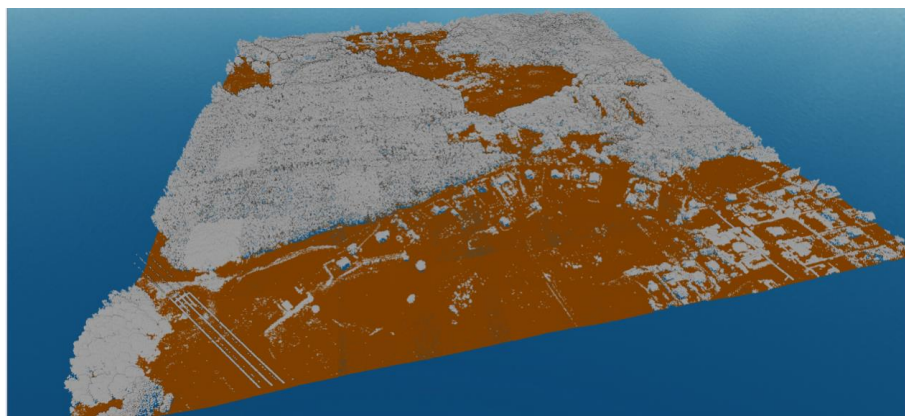
Klasifikavimą *Global Mapper* programa sudaro trys etapai. Pirmame etape suklasifikuoti žemės taškai, antrame pastatų bei augalijos, trečiame elektros taškai. Žemės taškų klasifikavimo parametrai:

- dėžutės dydis kreivės nuokrypiui tikrinti (angl. *base bin size to check for curvate deviations*) – 1 m;
- minimalus ne žemės taškų aukštis nuo vietinio vidurkio (angl. *minimum height departure from local mean for non-ground points*) – 0,3 m;
- maksimalus aukščio skirtumas (angl. *maximum height delta*) – 50 m;
- tikėtinas paviršiaus nuolydis (angl. *expected terrain slope*) – 7,5°;
- maksimalus pastato plotis (angl. *maximum building width*) – 50 m.

Žemiau pateikiami *Global Mapper* žemės klasifikavimo rezultatai 2D (4.14 pav.) ir 3D (4.15 pav.) aplinkose. Ruda spalva žymi žemės, pilka – ne žemės taškus. Suklasifikuotų žemės paviršiaus taškų skaičius – 15 849 060.

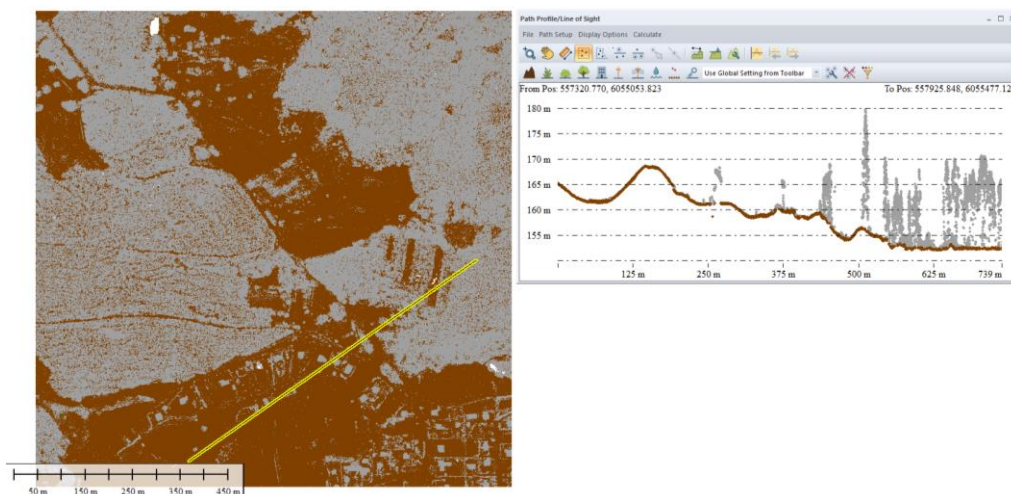


4.14 pav. Žemės klasė 2D aplinkoje

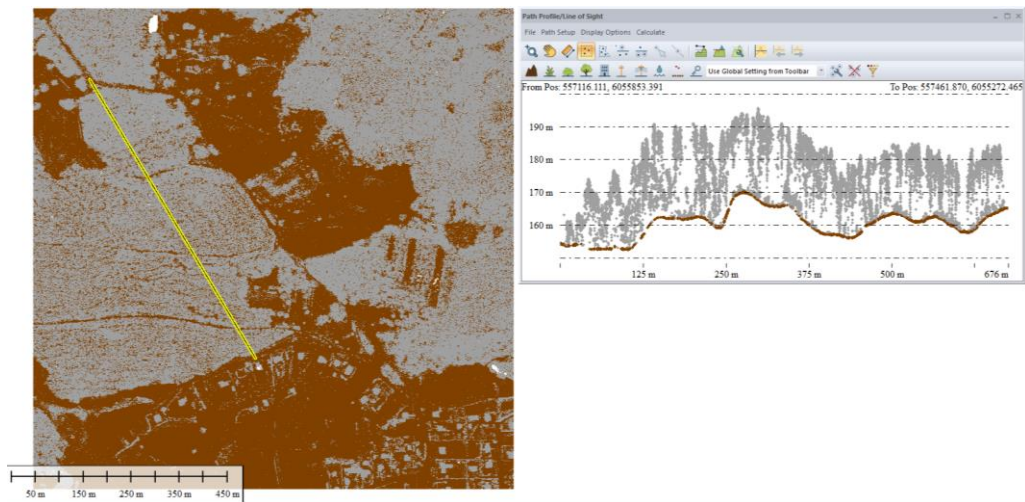


4.15 pav. Žemės klasė 3D aplinkoje

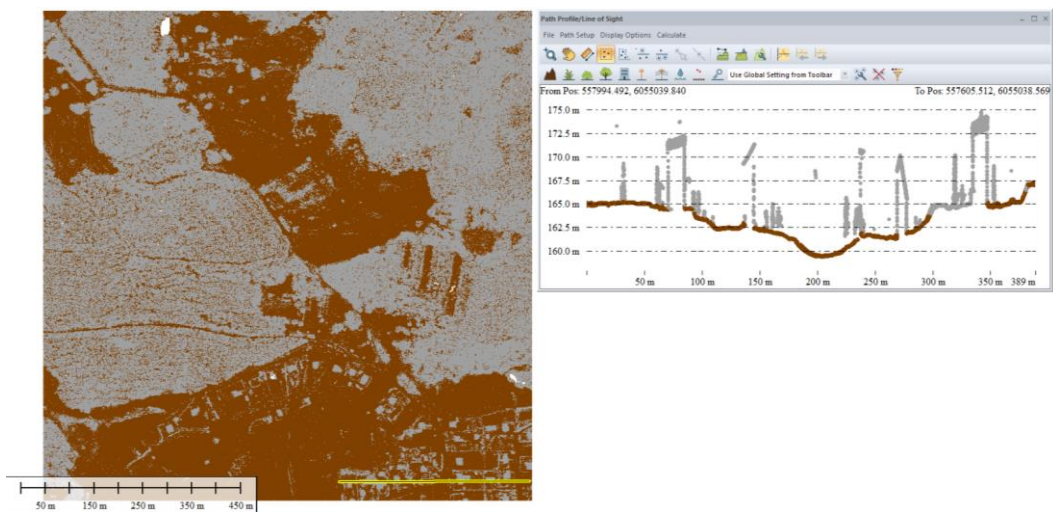
Pirmo klasifikavimo etapo kontrolei atlikti, sugeneruoti 0,5 m pločio profiliai, pateikiami 4.16–4.18 paveiksluose. Analizuojant profilius grubių klaidų neaptikta, klasifikavimas atliktas tvarkingai.



4.16 pav. Žemės klasės kontrolinis pjūvis



4.17 pav. Žemės klasės kontrolinis pjūvis

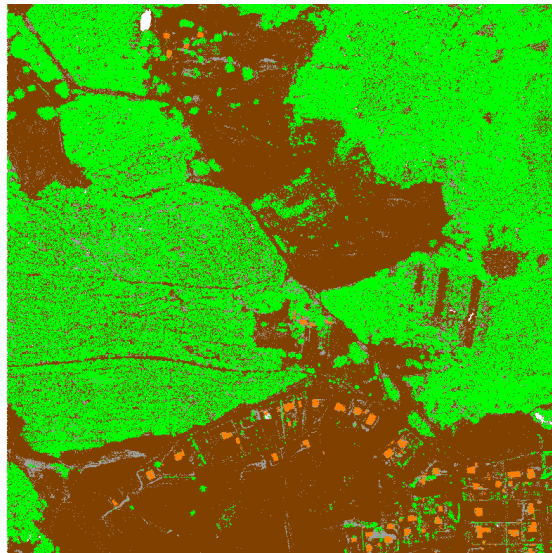


4.18 pav. Žemės klasės kontrolinis pjūvis

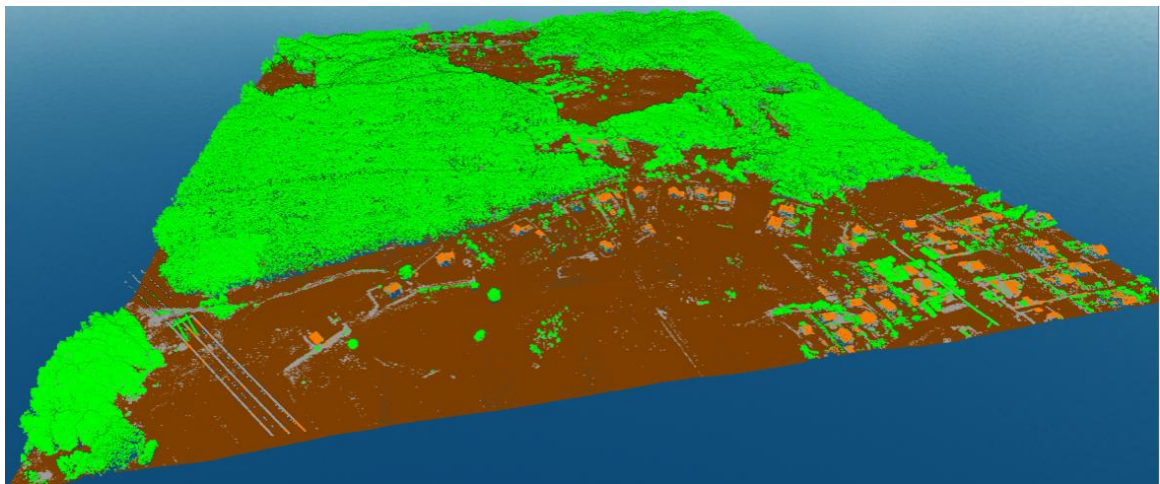
Antrame etape, naudojant segmentacijos metodą, atliktas ne žemės taškų klasifikavimas. Išskirtos augmenijos ir pastatų klasės. Atlikus kelis bandymus priimti optimaliausi parametrai:

- minimalus aukštis virš žemės (*angl. minimum height above ground*) – 1,5 m;
- kaimynystės diapazonas (*angl. neighborhood range*) – 3 m;
- maksimalus kaimynų skaičius (*angl. maximum number of neighbors*) – 64;
- minimalus kaimynų skaičius (*angl. minimum number of neighbors*) – 5;
- minimalus klasterio dydis (*angl. minimum cluster size*) – 10 taškų;
- didžiausias standartinis nuokrypis (*angl. maximum standart deviations*) – 5.

Augmenijos klasei priskirta 21 502 624 taškai, pastatų – 244 634. Klasifikavimo rezultatai pateikti 2D (4.19 pav.) ir 3D (4.20 pav.) aplinkose. Žalia spalva žymi augmenijos, oranžinė – pastatų, ruda – žemės klases.

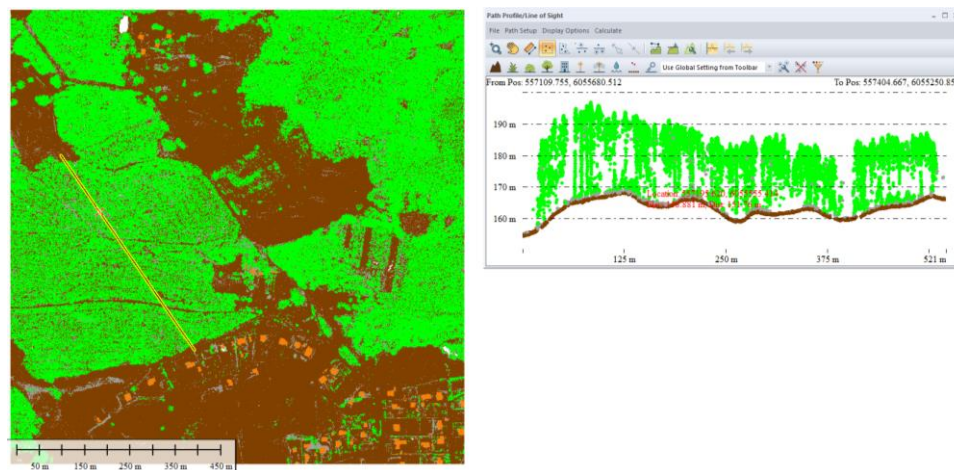


4.19 pav. Global Mapper klasifikavimo rezultatai 2D aplinkoje

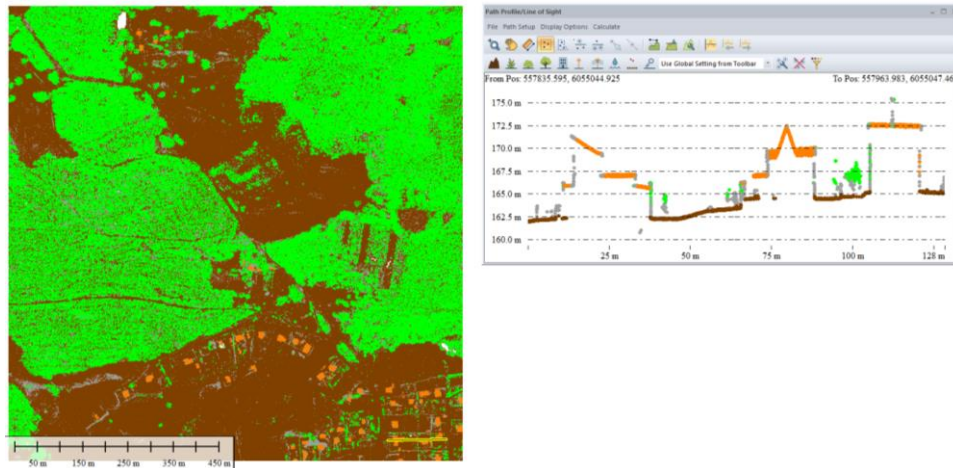


4.20 pav. Global Mapper klasifikavimo rezultatai 3D aplinkoje

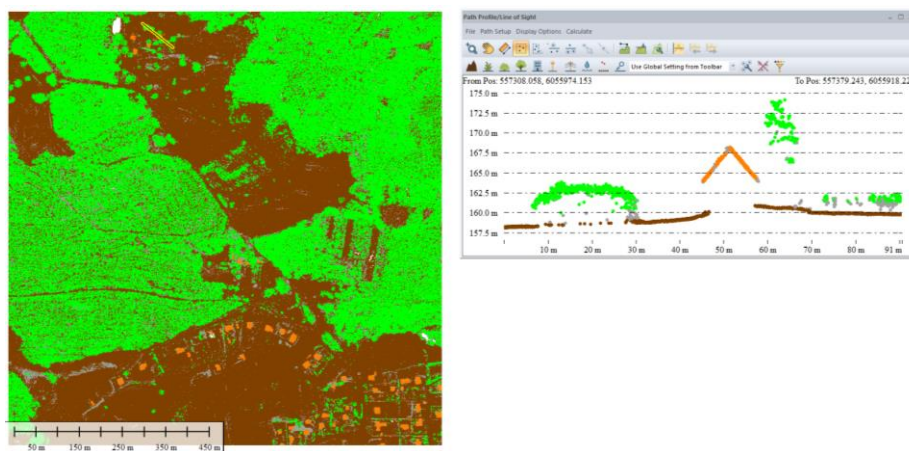
Antro klasifikavimo etapo kontrolei sugeneruoti pjūviai (4.21–4.24 pav.). Matyti, kad ties žemės paviršiumi ir augmenija yra pilkų (nesuklasifikuotų) taškų, taip pat liko nesuklasifikuotos pastatų sienos. Tačiau jokių grubių klaidų neaptikta.



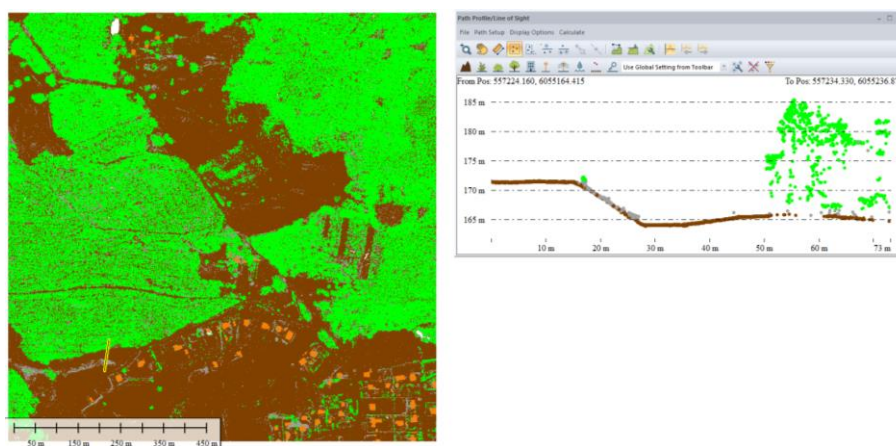
4.21 pav. Antro klasifikavimo etapo kontrolinis pjūvis



4.22 pav. Antro klasifikavimo etapo kontrolinis pjūvis



4.23 pav. Antro klasifikavimo etapo kontrolinis pjūvis

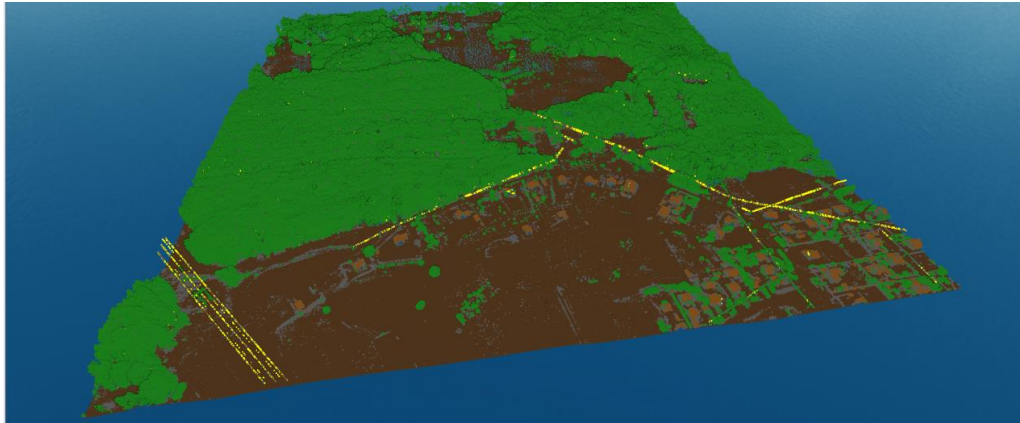


4.24 pav. Antro klasifikavimo etapo kontrolinis pjūvis

Trečiame etape suklasifikuotos elektros linijos. Atlikti keli bandymai su skirtingais klasifikavimo parametrais. Elektros linijos 4.25 paveiksle, pažymėtos geltona spalva, tiksliausiai buvo suklasifikuotos su šiais parametrais:

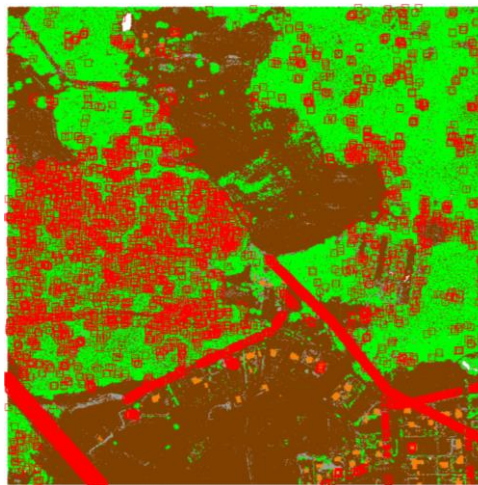
- minimalus aukštis virš žemės (angl. *minimum height above ground*) – 6 m;

- maksimalus atstumas nuo geriausiai aptiktos linijos (angl. *maximum dist from best fit line*) – 0,1 m;
- dėžutės dydis, tiesiniams taškams tikrinti (angl. *bin size to check for linear points*) – 1 m;
- maksimalus aukščio pokytis per metrą (angl. *maximum height change per meter*) – 0,4 m.



4.25 pav. Elektros klasė išskirta geltona spalva

Nors elektros laidai atpažinti ganėtinai išsamiai, taip pat aptikta labai daug klasifikavimo šiukšlių. Elektros klasės taškai 4.26 paveiksle pažymėti raudona spalva. Matyti, klasifikavimo klaidos vyrauja miško teritorijoje.

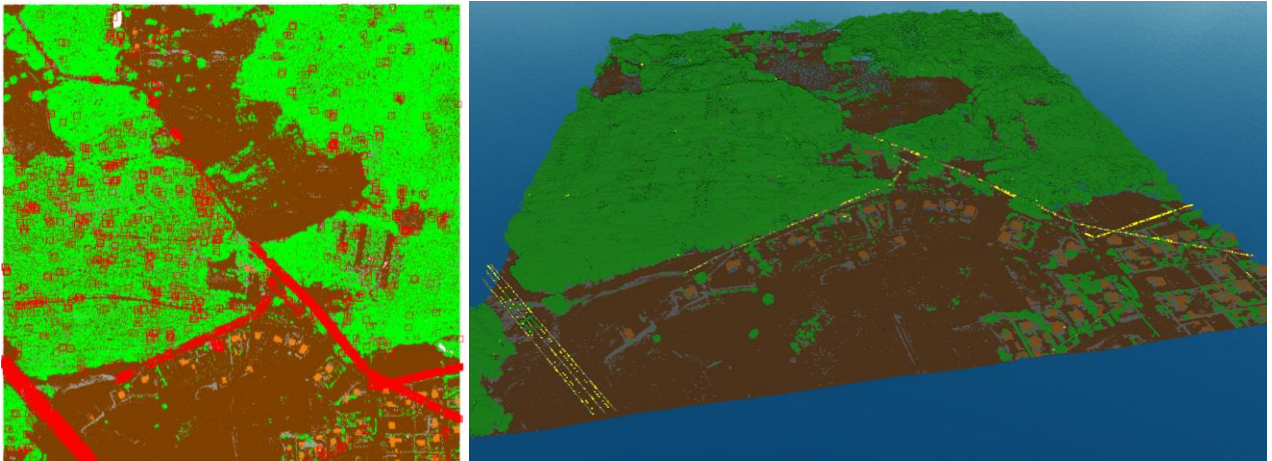


4.26 pav. Elektros klasė išskirta raudona spalva

Antras elektros klasifikavimo bandymas atliktas su šiais parametrais:

- minimalus aukštis virš žemės – 6 m;
- maksimalus atstumas nuo geriausiai aptiktos linijos – 0,05 m;
- dėžutės dydis, tiesiniams taškams tikrinti – 1,5 m;
- maksimalus aukščio pokytis per metrą – 0,4 m.

Iš rezultatų matyti, kad šiukšlių kiekis sumažėjo (4.27 pav. kairėje), tačiau elektros konstrukcijos taip pat atpažintos prasčiau (4.27 pav. dešinėje).

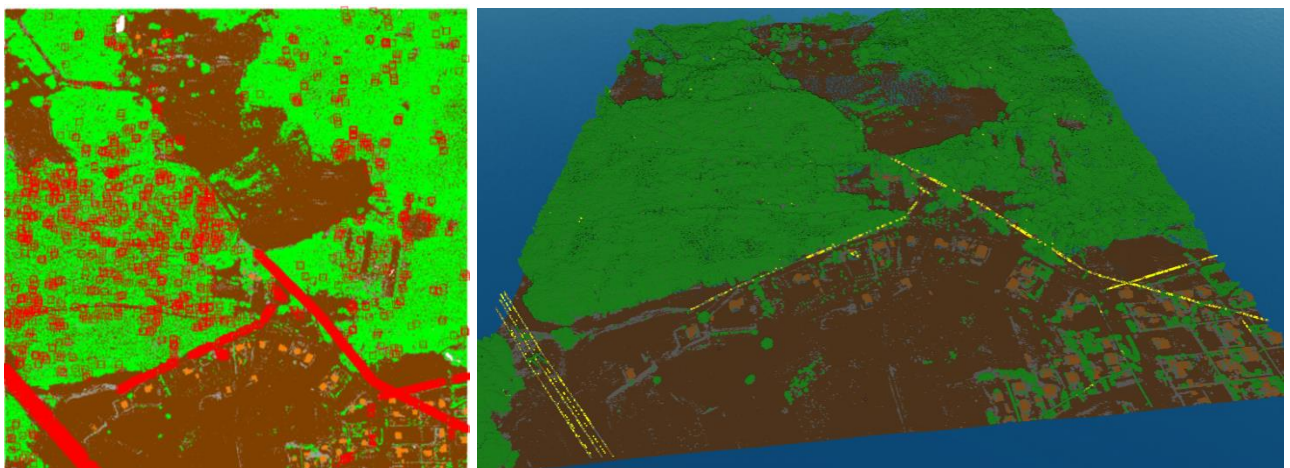


4.27 pav. Suklasifikuota elektros klasė: 2D vaizde išskirta raudona spalva (kairėje), 3D vaizde išskirta geltona spalva (dešinėje)

Galiausiai buvo parinkti optimalūs parametrai, su kuriais elektros linijos suklasifikuotos ganėtinai teisingai ir gautas palyginti nedidelis šiukšlių kiekis:

- minimalus aukštis virš žemės – 6 m;
- maksimalus atstumas nuo geriausiai aptiktos linijos – 0,01 m;
- dėžutės dydis, tiesiniams taškams tikrinti – 1 m;
- maksimalus aukščio pokytis per metrą – 0,4 m.

Žemiau pateiktuose elektros klasės klasifikavimo rezultatuose (4.28 pav.) matyti, kad klaidingai suklasifikuoti taškai pasiskirstę miško teritorijoje. Gerai atpažintos pagrindinės (dvigubos arba keturgubos) elektros linijos, atpažinta dalis pavienių elektros laidų. Suklasifikuotų elektros linijų taškų skaičius – 4 591. Bendra klasifikavimo proceso trukmė *Global Mapper* programa – 27 min.



4.28 pav. Suklasifikuota elektros klasė: 2D vaizde išskirta raudona spalva (kairėje), 3D vaizde išskirta geltona spalva (dešinėje)

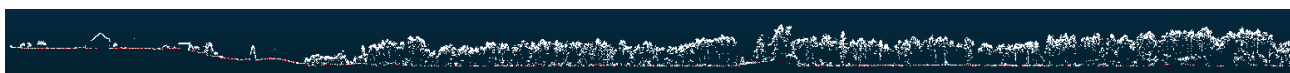
4.3. Klasifikavimas LasTools programa

LasTools programa klasifikavimo procesas taip pat atliktas trimis etapais. Pirmame etape suklasifikuoti žemės taškai su *LasGround* įrankiu, antrame etape kiekvienam ne žemės klasės taškui paskaičiuotas jo aukštis virš žemės paviršiaus su *LasHeigh* įrankiu, trečiame etape suklasifikuotos pastatų bei augmenijos klasės su *LasClassify* įrankiu. Žemės taškams klasifikuoti parinktas scenos tipas – *nature*, bei įprasta t. y. papildomai nesuaktyvinta žemės taškų paieška (angl. *default*). Gauta žemės paviršiaus klasė pateikiama 4.29 paveiksle 2D ir 3D aplinkose. Ją sudaro 10 331 924 taškai. Pažymėtina, kad taškų masyvo taškams RGB spalvos priskirtos iš aerofotonuotraukų, todėl žemės klasėje esantys miško žemės taškai yra medžių lapijos spalvos, dėl to gali atrodyti, kad Žemės klasei priskirti ir medžių klasės taškai.

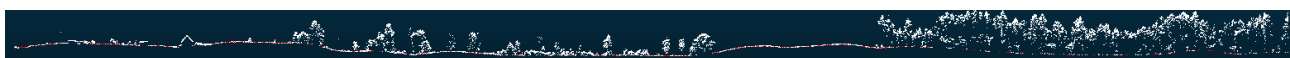


4.29 pav. LasTools suklasifikuota žemės klasė: 2D aplinkoje (kairėje), 3D aplinkoje (dešinėje)

Žemės taškų klasifikavimo kontrolei atlikti, sugeneruoti kontroliniai pjūviai sugretinus *LasTools* suklasifikuotus žemės taškus su išsamiais pradiniais duomenimis. Pjūvių vietos parinktos tos pačios, kaip ir tikrinant *CloudCompare* klasifikavimo rezultatus. Išilginiai pjūviai pateikiami 4.30–4.34 paveiksluose, skersiniai – 4.35–4.39 paveiksluose. Balta spalva žymi išsamius pradinius duomenis, raudona – *LasTools* suklasifikuotą žemės klasę. Tikrinant profilius, grubių klasifikavimo klaidų neaptikta, tačiau atkreipiamas dėmesys, jog *LasTools* suklasifikuota žemės klasė yra retesnė, nei suklasifikuota su *CloudCompare* programa.



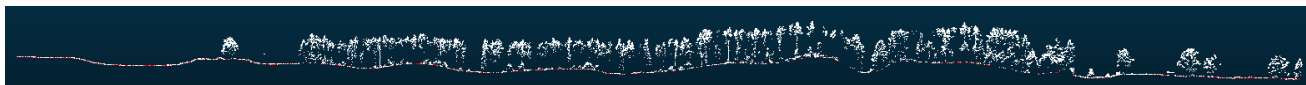
4.30 pav. Išilginis pjūvis Nr. 1



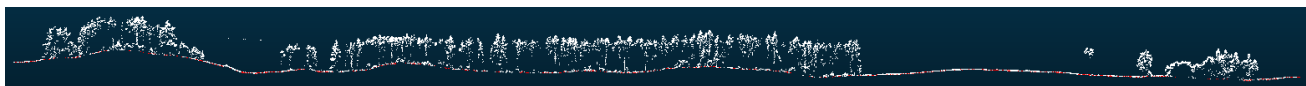
4.31 pav. Išilginis pjūvis Nr. 2



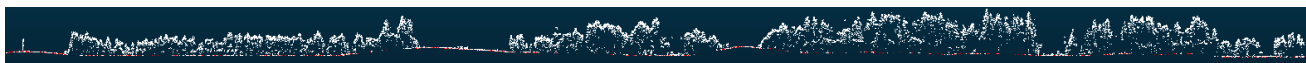
4.32 pav. Išilginis pjūvis Nr. 3



4.33 pav. Išilginis pjūvis Nr. 4



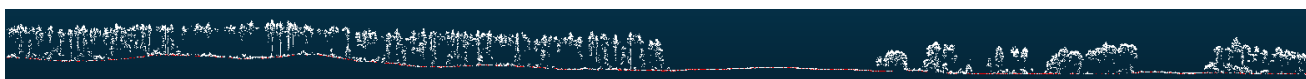
4.34 pav. Išilginis pjūvis Nr. 5



4.35 pav. Skersinis pjūvis Nr. 6



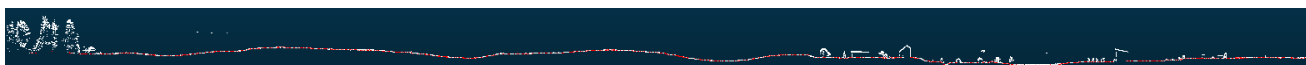
4.36 pav. Skersinis pjūvis Nr. 7



4.37 pav. Skersinis pjūvis Nr. 8



4.38 pav. Skersinis pjūvis Nr. 9



4.39 pav. Skersinis pjūvis Nr. 10

Antrame etape skaičiuoti taškų aukščiai virš žemės paviršiaus, naudojant *LasHeight* įrankį. Pasirinkta parinktis, kad taškų aukščiai būtų skaičiuojami nuo suklasifikuotų žemės paviršiaus taškų. Duomenų ištrauka su perskaičiuotais aukščiais pateikiama 4.40 paveiksle. Pirmame stulpelyje taško Y koordinatė (m), antrame stulpelyje taško X koordinatė (m), trečiame stulpelyje paskaičiuotas taško aukštis Z, virš žemės paviršiaus (m). Taškai, kurių Z reikšmė lygi 0, priklauso žemės klasei.

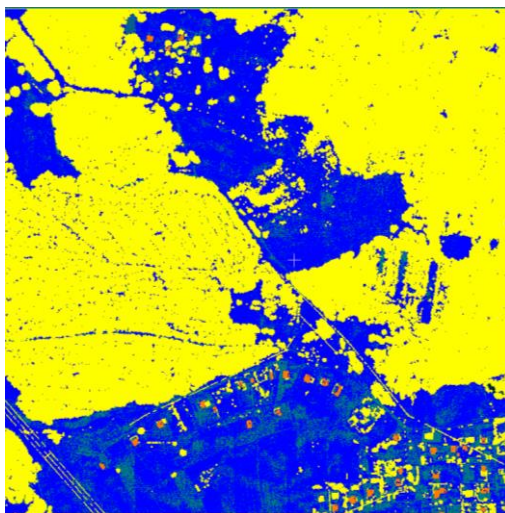
557674.980	6055190.990	0.000
557675.480	6055191.000	0.000
557675.920	6055190.990	0.000
557676.410	6055191.010	0.000
557676.850	6055191.010	0.000
557677.310	6055191.020	0.000
557677.740	6055191.020	0.000
557678.160	6055191.030	0.000
557678.640	6055191.030	0.044
557679.050	6055191.040	0.000
557679.540	6055191.040	0.044
557680.020	6055191.050	0.000

4.40 pav. *LasHeight* skaičiavimų rezultatų ištrauka

Trečiame etape atliktas pastatų ir augmenijos klasifikavimas *LASclassify* įrankiu. Pirmasis bandymas atliktas su numatytaisiais parametrais:

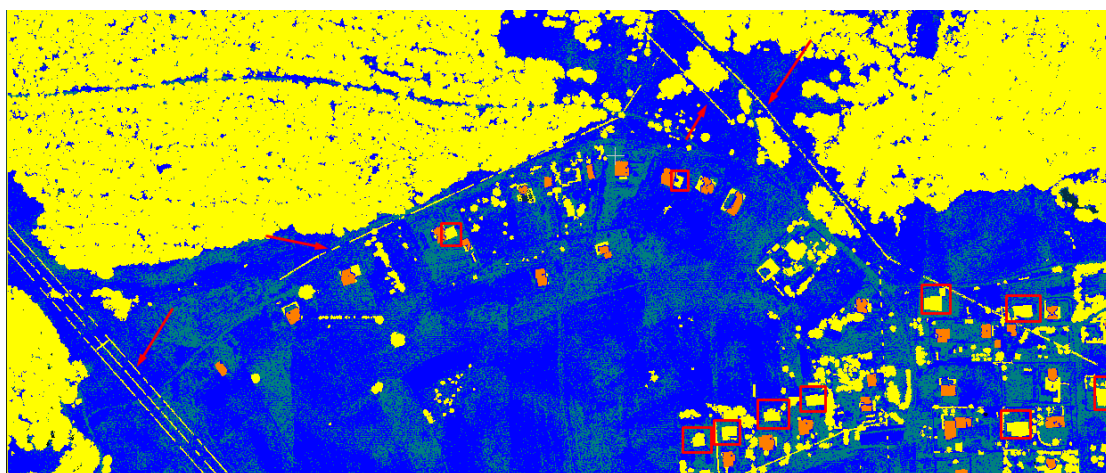
- paieškos srities dydis (angl. *search area size*) – 2 m;
- pastato plokštumas (angl. *building planarity*) – 0,1 m;
- miško tvirtumas (angl. *forest ruggedness*) – 0,4 m;
- atstumas nuo žemės (angl. *ground offset*) – 2 m;
- pažymėtos šios opcijos: yra latakai (angl. *include gutters*), nėra nedidelių pastatų (angl. *no tiny buildings*) ir nėra medžių išsikišimų (angl. *no tree overhang*).

Suklasifikuota 10 331 924 žemės, 21 553 930 aukštos augmenijos, 102 160 pastatų klasės taškų. 7 444 340 taškų liko nesuklasifikuoti. Iš pirmo žvilgsnio klasifikavimo rezultatai atrodo teisingi (4.41 pav.) – atpažinta augmenija, išskirta geltonas spalva ir pastatai, išskirti oranžine spalva.



4.41 pav. Pirmo klasifikavimo bandymo rezultatai

Tačiau išsamiau panagrinėjus rezultatus matyti, kad dalis pastatų (4.42 paveiksle pažymėta kvadratais), bei elektros linijos (4.42 paveiksle pažymėta rodyklėmis) yra priskirta medžių klasei.

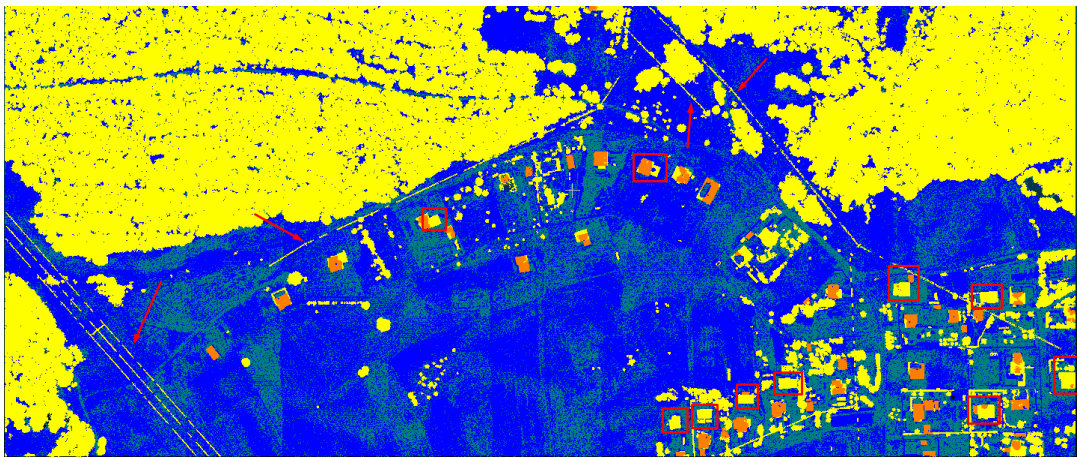


4.42 pav. Pirmo klasifikavimo bandymo rezultatai

Atliktas antras klasifikavimo bandymas su pakeistais parametrais:

- paieškos srities dydis – 2 m;
- pastato plokštumas – 0,1 m;
- miško tvirtumas – 0,4 m;
- atstumas nuo žemės – 1,6 m;
- pažymėtos šios pasirinktos: yra latakai ir platūs latakai.

Suklasifikuoti 10 331 924 žemės, 21 850 286 aukštos augmenijos, 133 379 pastatų klasės taškai. 7 115 765 taškai liko nesuklasifikuoti. Gauti rezultatai pagerėjo nežymiai. Vis tiek liko medžių klasei priskirtų pastatų stogų bei elektros laidų. Šios situacijos 4.43 paveiksle pažymėtos rodyklėmis ir kvadratais.

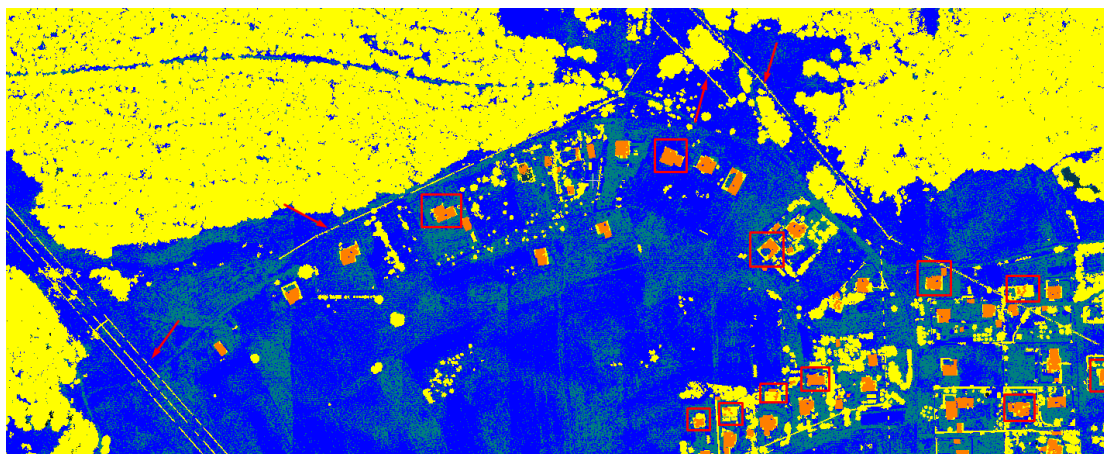


4.43 pav. Antro klasifikavimo bandymo rezultatai

Galiausiai buvo parinkti galutiniai klasifikavimo parametrai:

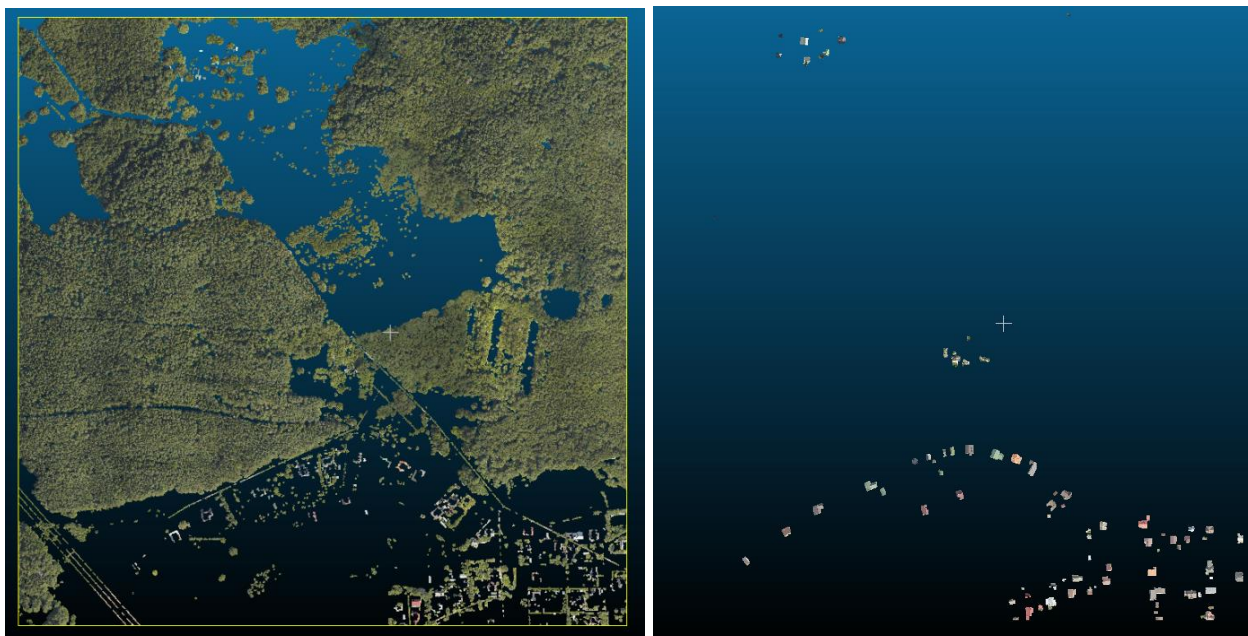
- paieškos srities dydis – 2 m;
- pastato plokštumas – 0,2 m;
- miško tvirtumas – 0,2 m;
- atstumas nuo žemės – 1 m;
- pažymėtos šios opcijos: yra latakai.

Suklasifikuoti 10 331 924 žemės, 22 280 215 aukštos augmenijos, 199 184 pastatų klasės taškai. Liko mažiausias skaičius nesuklasifikuotų taškų – 6 620 031. Nors elektros linijos buvo priskirtos medžių klasei, didžioji dalis pastatų suklasifikuoti teisingai. 4.44 paveiksle rodyklėmis pažymėti elektros laidai priskirti medžių klasei, kvadratais – pastatų stogai, kurie pirmų bandymų metu buvo priskirti augmenijos klasei.



4.44 pav. Trečio klasifikavimo bandymo rezultatai

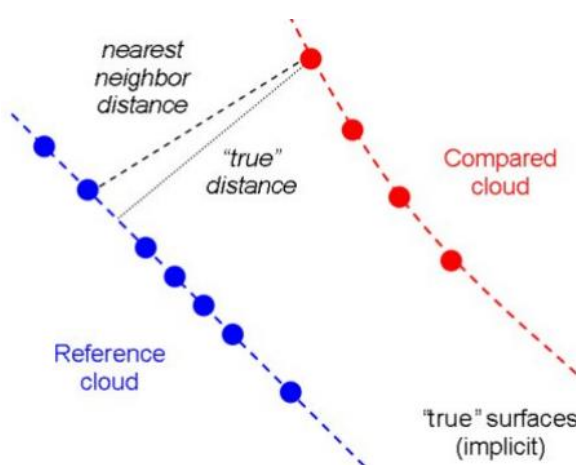
Suklasifikuotos augmenijos ir pastatų klasės pateikiamos 4.47 paveiksle. Klasifikavimo procesas *LasTools* programa truko ilgiausiai – 36 min.



4.45 pav. LasTools klasifikavimo rezultatai: augmenijos klasė (kairėje), pastatų klasė (dešinėje)

5. Klasifikavimo rezultatų tikslumo tyrimas

Klasifikavimo rezultatų tikslumo tyrimas atliekamas lyginant kiekvieną naujai suklasifikuotą duomenų klasę su atitinkama pradinių duomenų, suklasifikuotų *TerraScan* programa, klase. Rezultatų lyginimas atliekamas *CloudCompare* programa, naudojant *Cloud2Cloud* (C2C) metodą. Originalios klasifikacijos taškų masyvai nurodyti kaip referenciniai, tyrimo metu suklasifikuoti taškų masyvai kaip lyginamieji. Programa, kiekvienos lyginamosios klasės taškui suranda artimiausią tašką referenciniame debesyje ir apskaičiuoja atstumą iki jo. Randamas artimiausiųjų kaimynų atstumas (CloudCompare, 2015). Atstumo nustatymo principinė schema pateikiama 5.1 paveiksle.



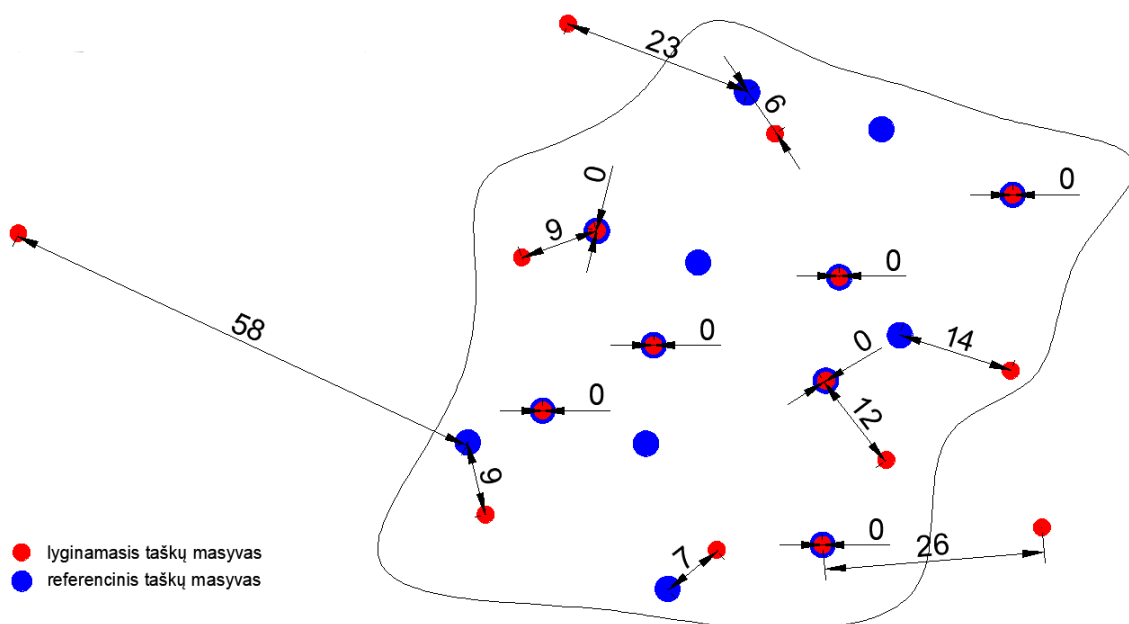
5.1 pav. Cloud2Cloud metodo principinė schema (CloudCompare, 2015)

Tyrimas atliktas keturiais etapais, kiekviename etape tirta skirtinga duomenų klasė. Kadangi, duomenų klasės suklasifikuotos naudojant daugiau nei vieną programą, etapai išskirti į papildomas dalis, kuriose referenciniai taškų masyvai kiekviename etape išliko tie patys, o lyginamieji taškų masyvai kito priklausomai nuo klasifikuoti naudotų programų. Tyrimo eiga pateikiama žemiau:

1. Žemės klasės tyrimas:
 - a) lyginamasis taškų masyvas – *LasTools* suklasifikuota žemės klasė, referencinis taškų masyvas – originaliai suklasifikuota žemės klasė;
 - b) lyginamasis taškų masyvas – *Global Mapper* suklasifikuota žemės klasė, referencinis taškų masyvas – originaliai suklasifikuota žemės klasė;
 - c) lyginamasis taškų masyvas – *CloudCompare* suklasifikuota žemės klasė, referencinis taškų masyvas – originaliai suklasifikuota žemės klasė.
2. Augmenijos klasės tyrimas:
 - a) lyginamasis taškų masyvas – *LasTools* suklasifikuota augmenijos klasė, referencinis taškų masyvas – originaliai suklasifikuota augmenijos klasė;

- b) lyginamasis taškų masyvas – *Global Mapper* suklasifikuota augmenijos klasė, referencinis taškų masyvas – originaliai suklasifikuota augmenijos klasė.
3. Pastatų klasės tyrimas:
- a) lyginamasis taškų masyvas – *LasTools* suklasifikuota pastatų klasė, referencinis taškų masyvas – originaliai suklasifikuota pastatų klasė;
 - b) lyginamasis taškų masyvas – *GlobalMapper* suklasifikuota pastatų klasė, referencinis taškų masyvas – originaliai suklasifikuota pastatų klasė;
4. Elektros klasės tyrimas:
- a) lyginamasis taškų masyvas – *GlobalMapper* suklasifikuota elektros klasė, referencinis taškų masyvas – originaliai suklasifikuota elektros klasė;

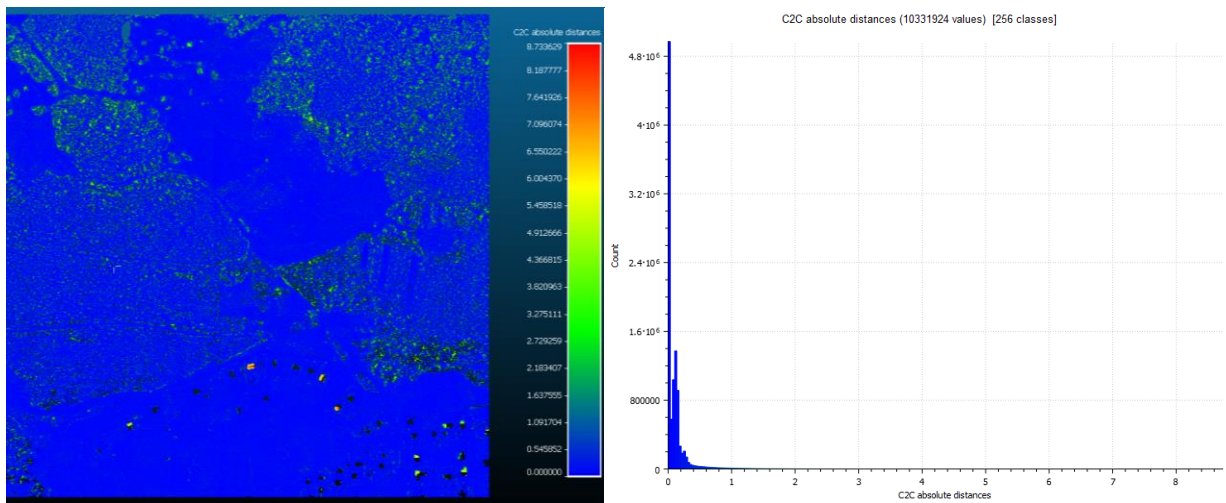
Tyrimo metu, analizuotas atstumas nuo tiriamos klasės taškų iki artimiausių kaimynų referenciniame taškų debesyje. Kiekviena klasifikuoti naudota programa yra pagrįsta skirtingu klasifikavimo algoritmu, todėl programos tai pačiai klasei nepriskiria visiškai vienodų taškų. 5.2 paveiksle pateiktas atstumo iki artimiausio kaimyno skaičiavimo pavyzdys. Mėlyni taškai žymi referencinį taškų masyvą, raudoni taškai žymi lyginamąjį taškų masyvą, suklasifikuotą programa X. Lyginamojo taškų masyvo kiekvienam taškui ieškomas artimiausias kaimynas referenciniame (mėlyname) taškų masyve. Taškai, kurie sutampa su referencinio taškų masyvo duomenimis yra nutolę 0 cm atstumu, nesutampantiems taškams skaičiuojamas atstumas iki artimiausio taško referenciniame taškų masyve. Priklausomai nuo pradinių duomenų tankumo, nedideliu atstumu nutolę taškai, vis tiek identifikuoja tą patį objektą (pastato stogą, medį ar pan.), tuo tarpu dideliu atstumu nutolę taškai, galimai yra klaidingai suklasifikuoti ir reikalauja papildomo tikrinimo.



5.2 pav. Atstumo iki artimiausio kaimyno skaičiavimo pavyzdys

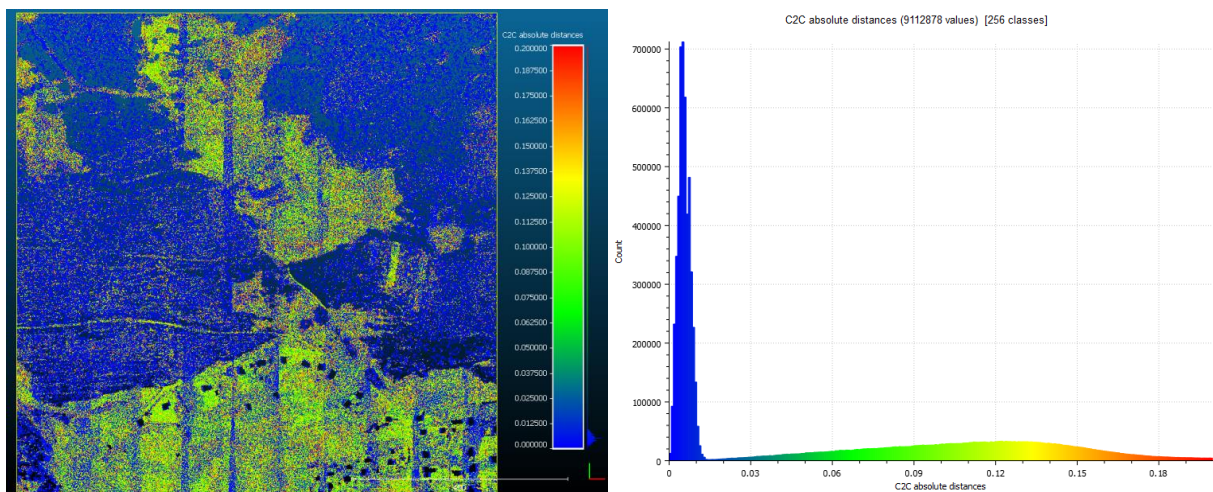
5.1. Žemės klasės tyrimas

Pirmiausia su originaliais duomenimis lyginta žemės klasė suklasifikuota *LasTools*. Originalių duomenų žemės klasė parinkta kaip referencinis taškų masyvas, *LasTools* suklasifikuota žemės klasė kaip lyginimasis taškų masyvas. Iš C2C skaičiavimų rezultatų (5.3 pav. kairėje) matyti, kad atstumas nuo *LasTools* suklasifikuotos žemės klasės taškų iki artimiausių kaimynų referenciniame taškų masyve vyrauja nuo 0 iki 8,73 m. Akivaizdžiai išsiskiria klasifikavimo klaidos – žemės klasei priskirti pastatų stogai. Iš duomenų histogramos (5.3 pav. dešinėje) matyti, kad didžioji dalis *LasTools* suklasifikuotų taškų (9 112 878 iš 10 331 924) nuo originalių duomenų nutolę per 0,2 m. Detalesnei analizei duomenys išskirti į du intervalus 0–0,2 m ir 0,2–8,73 m.



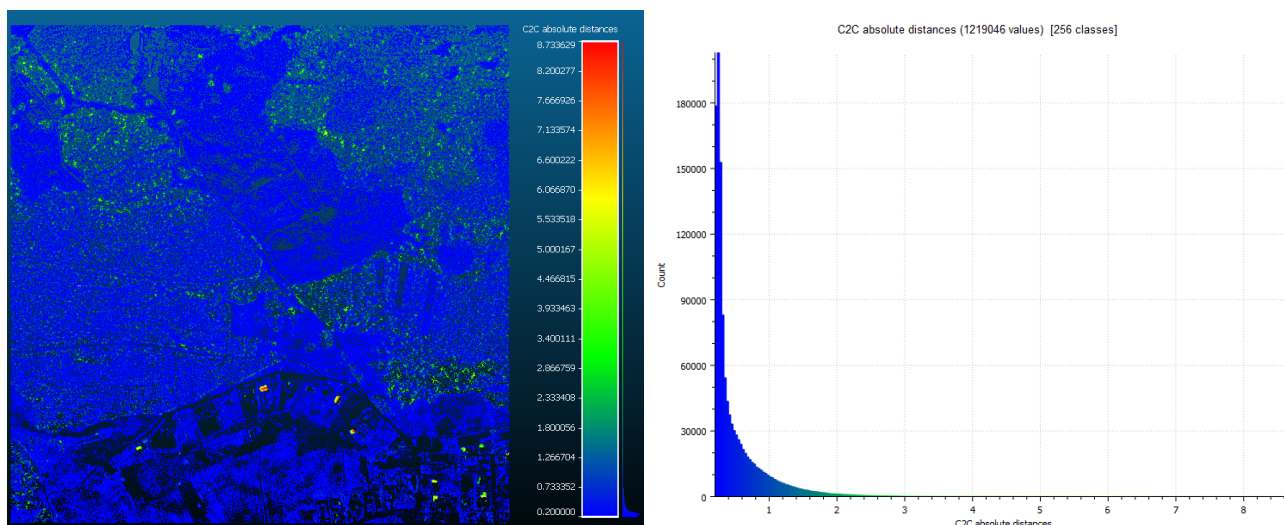
5.3 pav. C2C skaičiavimo rezultatai (kairėje), duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)

Iš pirmojo intervalo duomenų histogramos (5.4 pav. dešinėje) matyti, kad didžioji dalis taškų (4 859 952 iš 9 112 878) nutolę 1,5 cm. ribose, o likusių taškų kiekis, tolygiai didėja iki 12 cm atstumo nuo pradinių duomenų, po to ima tolygiai mažėti. Mažiausias 1,5 cm atstumas vyrauja miško teritorijoje, likę tolygiai pasiskirstę pievoje ir urbanizuotoje teritorijoje (5.4 pav. kairėje).



5.4 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0–20 cm intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)

Iš antrojo intervalo histogramos (5.5 pav. dešinėje) matyti, kad didžioji dalis taškų (1 071 423 iš 1 219 046) nuo artimiausių kaimynų referenciniame taškų masyve nutolę per 0,2–1 m. Vyraujančių mažiausio atstumo zonų nėra (5.5 pav. kairėje). Didžiausi nuotoliai išryškėja miško ribose, taip pat galima identifikuoti klaidingai suklasifikuotus pastatų stogus.



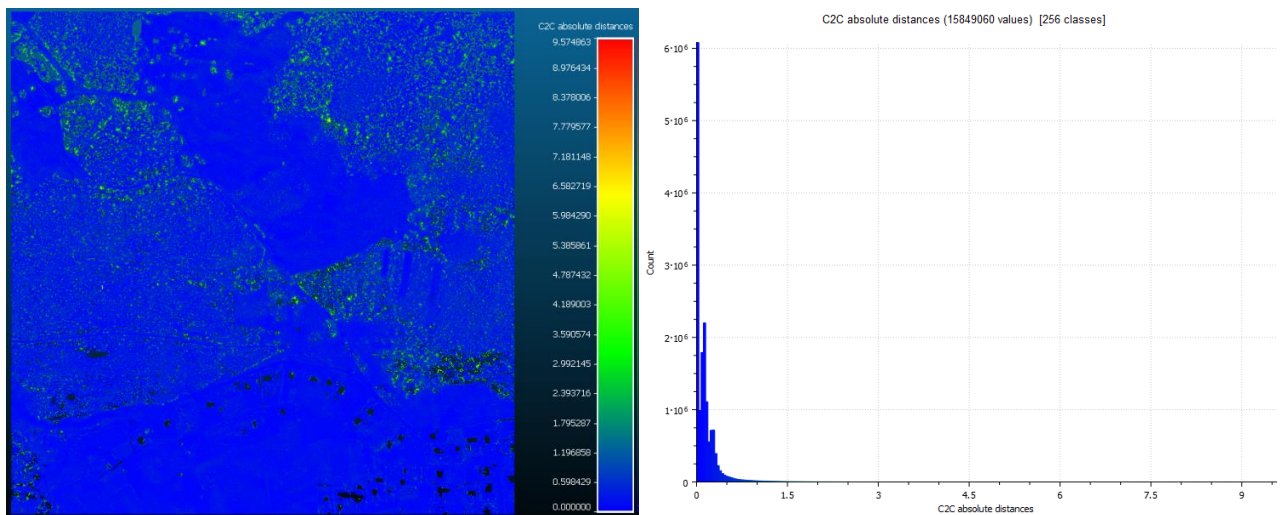
5.5 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0,2–8,73 m intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)

LasTools suklasifikuotų žemės taškų atstumo nuo pradinių duomenų, pasiskirstymas intervalais pateiktas 5.1 lentelėje. Išanalizavus duomenų pasiskirstymą nustatyta, kad taškai, nutolę per daugiau nei 2 m yra klaidingai suklasifikuoti pastatų stogai ir medžiai. *LasTools* suklasifikuotai žemės klasei iš viso priskirti 10 331 924 taškai, iš jų 99,71 % suklasifikuoti teisingai, 0,29 % suklasifikuoti neteisingai.

5.1 lentelė. *LasTools* suklasifikuotų žemės klasės taškų pasiskirstymas intervalais

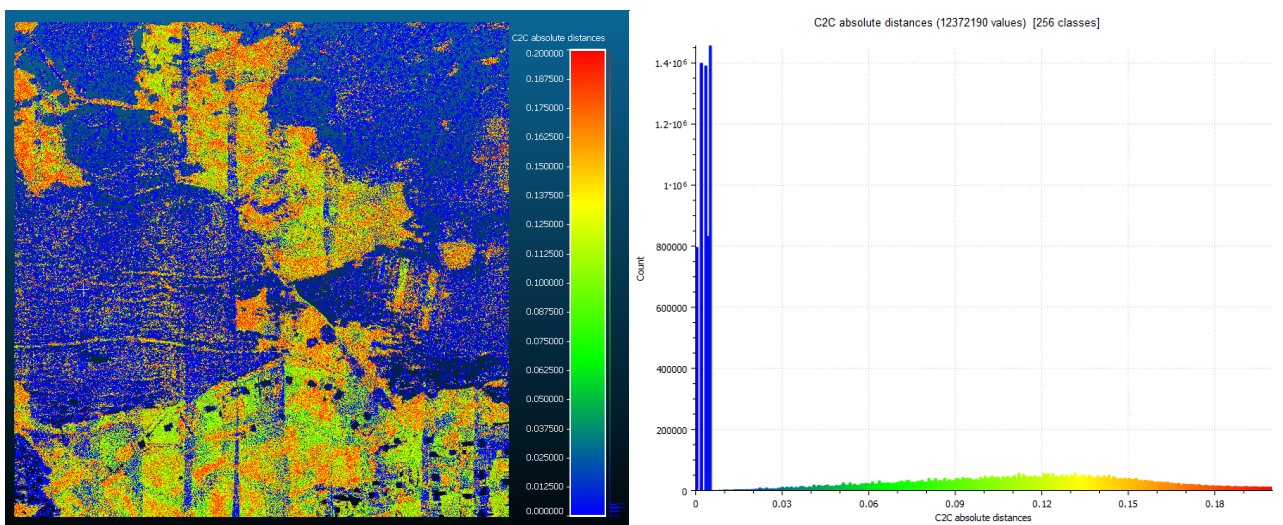
Atstumas iki artimiausio taško, referenciniame taškų masyve, m	Taškų skaičius, vnt	Taškų kiekis, %
0–0,05	5 192 987	50,26
0,05–0,10	1 336 847	12,95
0,10–0,15	1 931 084	18,69
0,15–0,20	651 960	6,3
0,2–0,5	816 170	7,89
0,5–1	255 253	2,47
1–2	118 742	1,15
Suma:	10 303 041	99,71
2–3	16 752	0,16
3–4	3 725	0,04
4–5	3 276	0,03
5–6	2 442	0,02
6–7	1 625	0,02
7–8,37	1 061	0,01
Suma:	28 883	0,29

Toliau su originaliais duomenimis palyginta žemės klasė suklasifikuotas *GlobalMapper*. Originalių duomenų žemės klasė parinkta kaip referencinis, *GlobalMapper* suklasifikuota žemės klasė kaip lyginimasis taškų masyvas. Iš C2C skaičiavimų rezultatų (5.6 pav. kairėje) matyti, kad atstumas nuo *Global Mapper* suklasifikuotos žemės klasės taškų iki artimiausių kaimynų referenciniame taškų masyve vyrauja nuo 0 iki 9,57 m. Akivaizdžių klasifikavimo klaidų nepastebėta. Didesni atstumai vyrauja miško zonose. Iš duomenų histogramos (5.6 pav. dešinėje) nustatyta, kad didžioji dalis *GlobalMapper* suklasifikuotų taškų (12 372 190 iš 15 849 060) nuo originalių duomenų nutolę per 0,2 m. Detalesnei analizei duomenys išskirti į du intervalus 0–0,2 m ir 0,2–9,57 m.



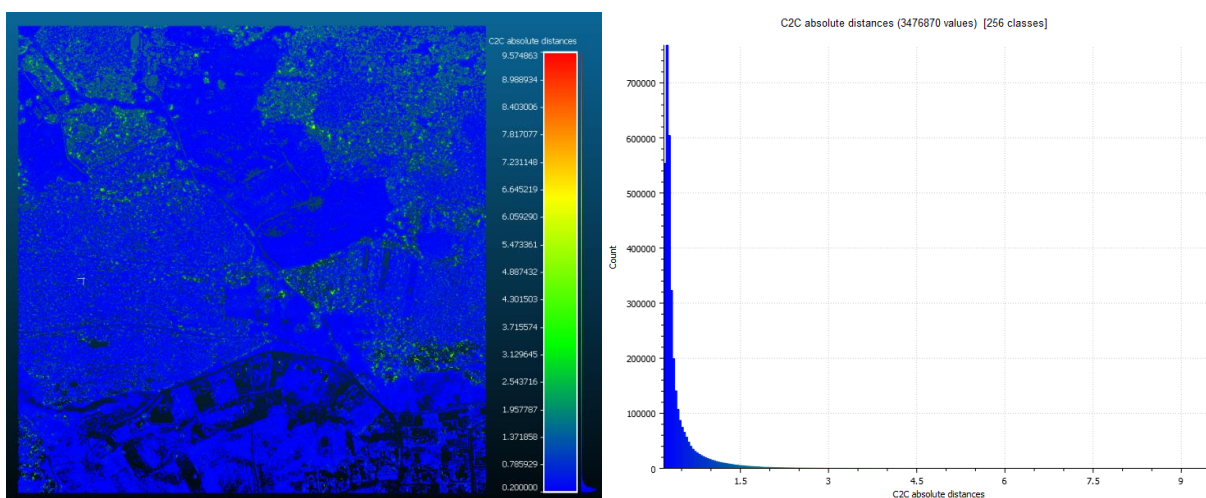
5.6 pav. C2C skaičiavimo rezultatai (kairėje), duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)

Iš pirmojo intervalo histogramos (5.7 pav. dešinėje) nustatyta, kad didžioji dalis *Global Mapper* suklasifikuotų taškų (5 876 415) nutolę 1 cm ribose, likusių taškų kiekis, tolygiai didėja iki 12 cm atstumo, po to ima tolygiai mažėti. Mažiausias 1 cm nuotolis vyrauja miško teritorijoje, likę duomenys tolygiai pasiskirstę pievoje ir urbanizuotoje teritorijoje (5.7 pav. kairėje).



5.7 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0–20 cm intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)

Iš antrojo intervalo histogramos (5.8 pav. dešinėje) matyti, kad dauguma taškų (3 281 571) nuo pradinio klasifikavimo taškų nutolę per 0,2–1 m. Didėjant atstumui taškų kiekis tolygiai mažėja. Zonų, kuriose vyrauja mažiausias atstumas iki artimiausių kaimynų referenciniame taškų masyve, nėra (5.8 pav. kairėje). Didžiausi nuotoliai išryškėja miško ribose.



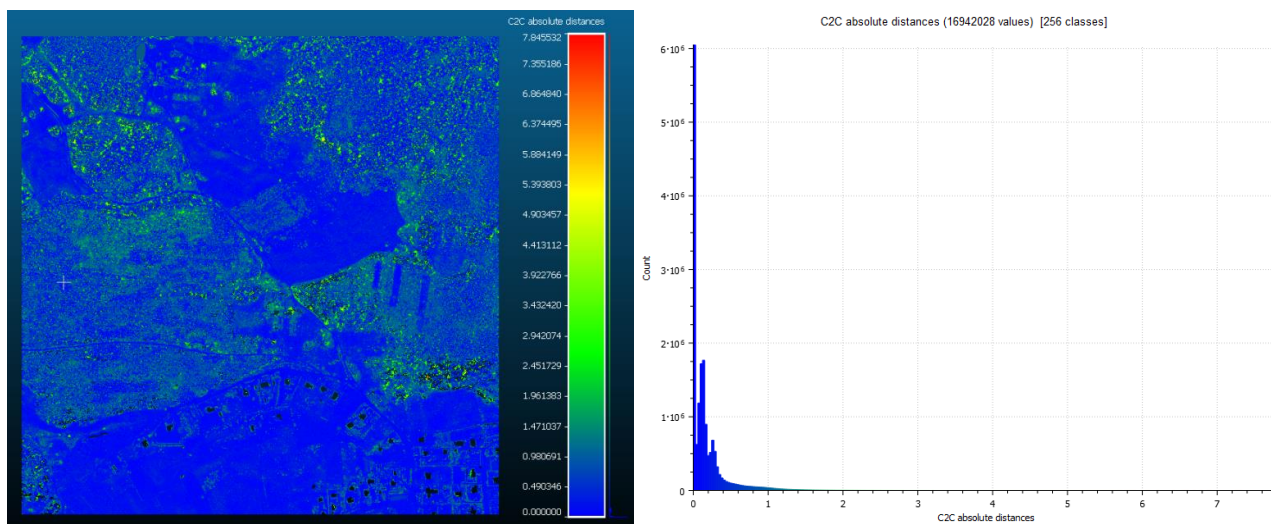
5.8 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0,2–8,57 m intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)

GlobalMapper suklasifikuotų žemės taškų atstumo iki pradinių duomenų, pasiskirstymas intervalais pateiktas 5.2 lentelėje. Išanalizavus duomenų pasiskirstymą nustatyta, kad taškai, nutolę nuo artimiausių kaimynų referenciniame taškų masyve, per daugiau nei 2 m yra klaidingai suklasifikuoti medžiai. *GlobalMapper* suklasifikuotai žemės klasei iš viso priskirta 15 849 060 taškų, iš jų 99,85 % suklasifikuoti teisingai, 0,15 % suklasifikuoti neteisingai.

5.2 lentelė. *Global Mapper* suklasifikuotų žemės klasės taškų pasiskirstymas intervalais

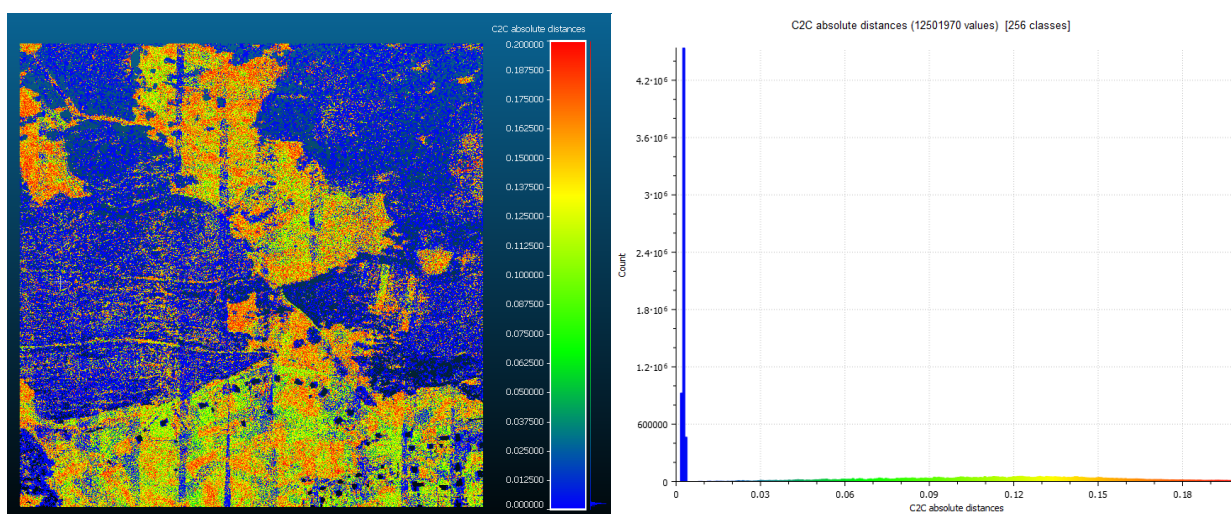
Atstumas iki artimiausio taško, referenciniame taškų masyve, m	Taškų skaičius, vnt	Taškų kiekis, %
0–0,05	6 332 398	39,95
0,05–0,10	1 903 093	12,01
0,10–0,15	2 885 503	18,21
0,15–0,20	1 250 196	7,89
0,2–0,5	2 858 100	18,03
0,5–1	425 980	2,69
1–2	169 475	1,07
Suma:	15 824 745	99,85
2–3	20 511	0,13
3–4	3 115	0,02
4–5	582	0,00
5–6	85	0,00
6–7	13	0,00
7–8	4	0,00
8–9	2	0,00
9–9,57	3	0,00
Suma:	24 315	0,15

Toliau su originaliais duomenimis lyginta žemės klasė suklasifikuota *CloudCompare*. Originalių duomenų žemės klasė parinkta kaip referencinis taškų masyvas, *CloudCompare* suklasifikuota žemės klasė kaip lyginimasis taškų masyvas. Iš C2C skaičiavimų rezultatų (5.9 pav. kairėje) nustatyta, kad atstumas nuo *CloudCompare* suklasifikuotos žemės klasės taškų iki artimiausių kaimynų referenciniame taškų masyve vyrauja nuo 0 iki 7,84 m. Akivaizdžių klasifikavimo klaidų nepastebėta. Didesni nuotoliai vyrauja miško zonose. Iš duomenų histogramos (5.9 pav. dešinėje) nustatyta, kad dauguma *CloudCompare* suklasifikuotų taškų (12 501 970 iš 16 942 028) nuo pradinių duomenų nutolę taip pat per 0,2 m. Detalesnei analizei duomenys išskirti į du intervalus 0–0,2 m ir 0,2–7,84 m.



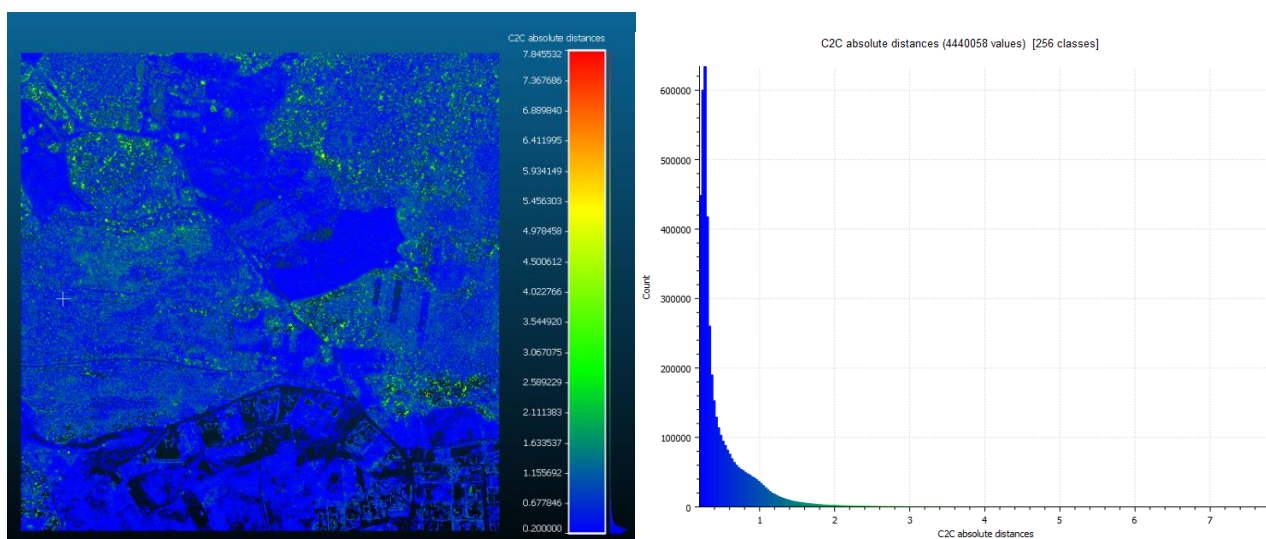
5.9 pav. C2C skaičiavimo rezultatai (kairėje), duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)

Iš pirmojo intervalo histogramos (5.10 pav. dešinėje) pastebėta, kad dauguma taškų (5 930 394) nuo artimiausių kaimynų referenciniame taškų masyve nutolę 1 cm ribose. Likusių taškų kiekis, tolygiai didėja iki 14 cm atstumo, po to ima tolygiai mažėti. Mažiausias 1 cm nuotolis vyrauja miško teritorijoje likę intervalo nuotoliai tolygiai pasiskirstę pievoje ir urbanizuotoje teritorijoje (5.10 pav. kairėje).



5.10 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0–20 cm intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)

Iš antrojo intervalo histogramos (5.11 pav. dešinėje) nustatyta, kad didžioji dalis intervalo taškų (4 052 172) nuo pradinių duomenų nutolę per 0,2–1m. Taškų kiekis didėjant atstumui tolygiai mažėja. Zonų, kuriose vyrautų mažiausias atstumas iki artimiausių kaimynų referenciniame taškų masyve, nėra (5.11 pav. kairėje). Didžiausi atstumai išryškėja miško teritorijoje.



5.11 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0,2–7,84 m intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)

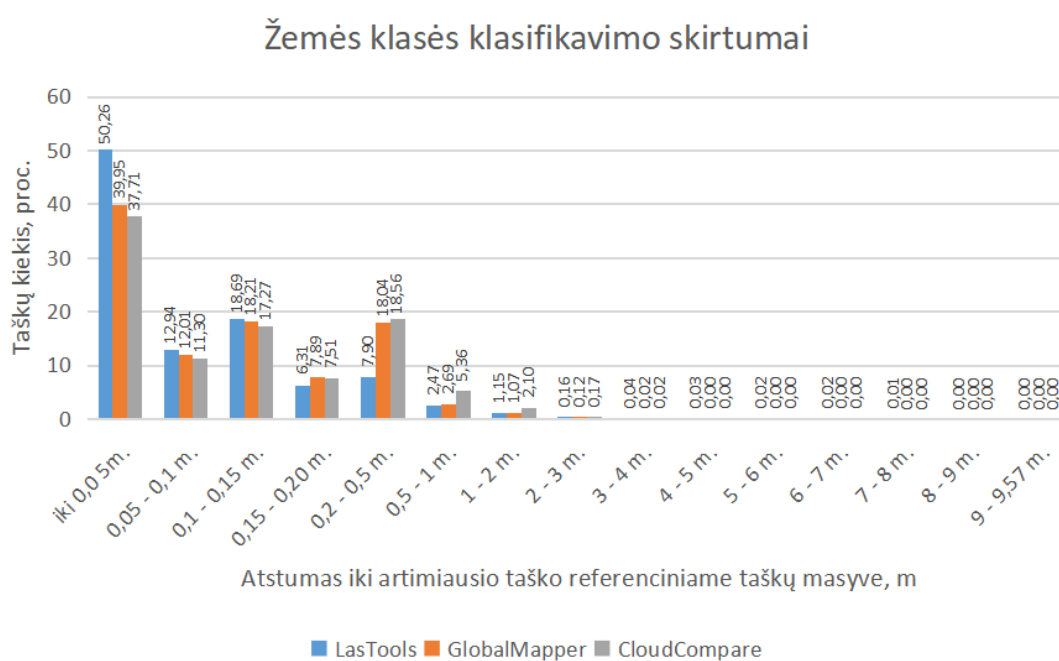
CloudCompare suklasifikuotų žemės taškų atstumo iki pradinių duomenų, pasiskirstymas intervalais pateiktas 5.3 lentelėje. Išanalizavus duomenų pasiskirstymą nustatyta, kad taškai, nutolę nuo artimiausių kaimynų referenciniame taškų masyve, per daugiau nei 2 m yra klaidingai suklasifikuoti medžiai. *CloudCompare* suklasifikuotai žemės klasei iš viso priskirti 16 942 028 taškai, iš jų 99,80 % suklasifikuoti teisingai, 0,20 % suklasifikuoti neteisingai.

5.3 lentelė. *CloudCompare* suklasifikuotų žemės klasės taškų pasiskirstymas intervalais

Atstumas iki artimiausio taško, referenciniame taškų masyve, m	Taškų skaičius, vnt	Taškų kiekis, %
0–0,05	6 389 384	37,71
0,05–0,10	1 914 033	11,30
0,10–0,15	2 925 562	17,27
0,15–0,20	1 272 991	7,51
0,2–0,5	3 143 943	18,56
0,5–1	907 563	5,36
1–2	354 384	2,09
Suma:	16 907 860	99,80
2–3	29 169	0,17
3–4	4 181	0,03
4–5	684	0,00
5–6	114	0,00
6–7	15	0,00
7–7,84	5	0,00
Suma:	32 602	0,20

Žemės klasės klasifikavimo rezultatams palyginti, sudaryta stulpelinė diagrama (5.12 pav.). Kadangi skirtingomis programomis suklasifikuotų taškų skaičius skiriasi, tarpusavio rezultatams lyginti, pasirinkta procentinė taškų kiekio išraiška. Taškų kiekis procentais skaičiuojamas nuo viso atitinkamos klasės taškų skaičiaus: *LasTools* – 10 331 924, *GlobalMapper* – 15 849 060, *CloudCompare* – 16 942 028.

Diagramoje atsispindi, kokia dalis žemės klasės taškų procentais, patenka į atitinkamą atstumo (iki artimiausio kaimyno referenciniame taškų masyve) intervalą, išreikštą metrais. Iš diagramos matyti, kad didžiausia dalis taškų patenkančių į mažiausio nuotolio intervalus (0–0,05 m, 0,05–0,10 m ir 0,10–0,15 m) yra suklasifikuoti *LasTools* programa (mėlynas stulpelis). Nors *GlobalMapper* (oranžinis stulpelis) ir *CloudCompare* (pilkas stulpelis) programomis suklasifikuotų taškų procentinės dalys šiuose intervaluose tarpusavyje labai panašios, *CloudCompare* dalis visgi yra nežymiai mažesnė. Tuo tarpu į didesnio atstumo intervalus (0,15–2 m) patenkanti *LasTools* suklasifikuotų taškų dalis yra mažiausia, o likusiųjų programų didesnė. Į didesnius nei 2 m intervalus patenkančių taškų kiekis visose programose yra nereikšmingas ir mažesni nei 0,2 %.



5.12 pav. Žemės klasės rezultatų palyginimo diagrama

Taip pat buvo patikrinta, kokią dalį pradinės žemės klasės taškų atpažino kiekviena programa. Iš 5.4 lentelės matyti, kad mažiausiai pradinės žemės klasės taškų atpažino *LasTools* programa (79,78 %) tuo tarpu *Global Mapper* ir *CloudCompare* atpažino labai panašų taškų kiekį, atitinkamai 99,76 ir 99,05 %. Naujai aptiktų taškų (kurių nebuvo pradinėje žemės klasėje) skaičius *LasTools*

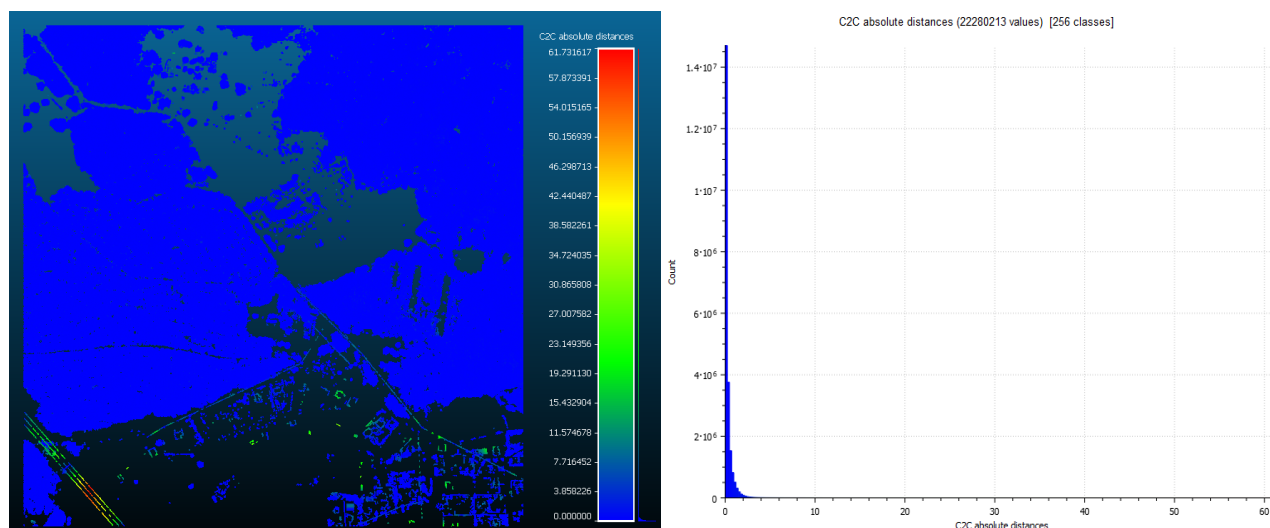
suklasifikuotoje žemės klasėje yra mažiausias – 5,5 mln., tuo tarpu *Global Mapper* ir *Cloud Compare* naujai aptiktų taškų skaičius taip pat yra labai panašus, atitinkamai 9,9 ir 11,0 mln.

5.4 lentelė. Aptiktų pradinės žemės klasės taškų kiekis

Programa	Teisingai suklasifikuotų taškų sk.	Pradinės žemės klasės taškų sk.	Aptiktų pradinės žemės klasės taškų sk.	Neaptiktų pradinės žemės klasės taškų sk.	Naujai aptiktų taškų sk.
LasTools	10 303 041	5 932 183	4 732 515 (79,78 %)	1 199 668 (20,22 %)	5 570 526
Global Mapper	15 824 745		5 917 659 (99,76 %)	14 524 (0,24 %)	9 907 086
Cloud Compare	16 907 860		5 875 836 (99,05 %)	56 347 (0,95 %)	11 032 024

5.2. Augmenijos klasės tyrimas

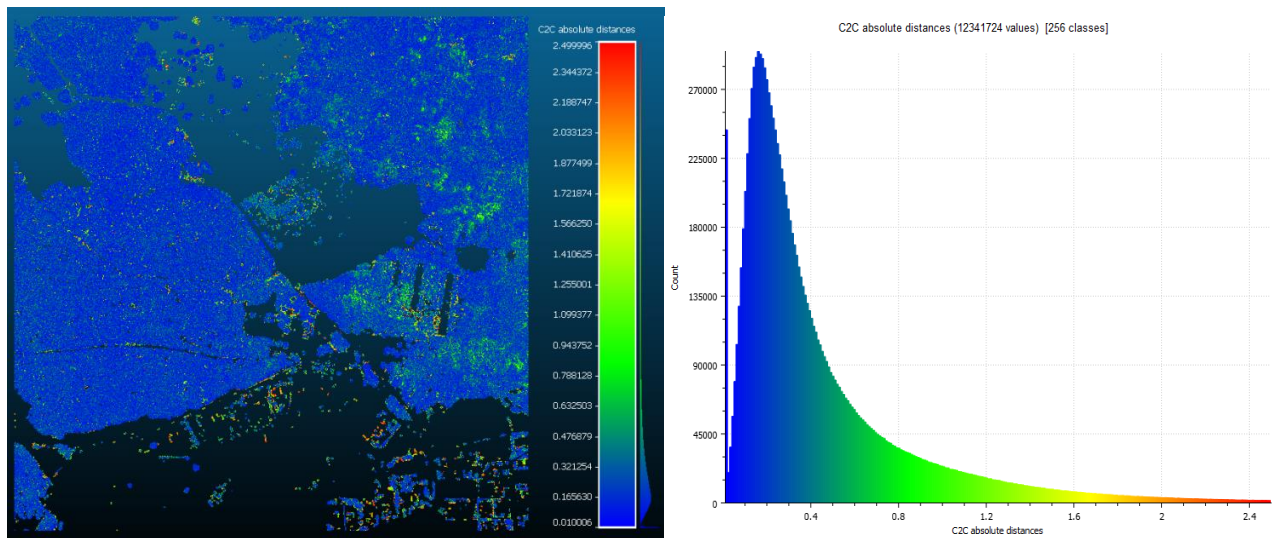
Su originaliais duomenimis pirmiausia lyginta augmenijos klasė suklasifikuota *LasTools*. Pradinių duomenų augmenijos klasė parinkta kaip referencinis taškų masyvas, *LasTools* suklasifikuota augmenijos klasė kaip lyginimasis taškų masyvas. Iš C2C skaičiavimų rezultatų (5.13 pav. kairėje) matyti, kad atstumas nuo *LasTools* suklasifikuotos žemės klasės taškų iki artimiausių kaimynų referenciniame taškų masyve vyrauja nuo 0 iki 61,73 m. Iš duomenų histogramos (5.13 pav. dešinėje) nustatyta, kad didžioji dalis *LasTools* suklasifikuotų taškų (22 111 999 iš 22 280 215) nuo pradinės augmenijos klasės nutolę taip pat per 2,5 m. Detalesnei analizei duomenys išskirti į du intervalus 0–2,5 m ir 2,5–61,73 m.



5.13 pav. C2C skaičiavimo rezultatai (kairėje), duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)

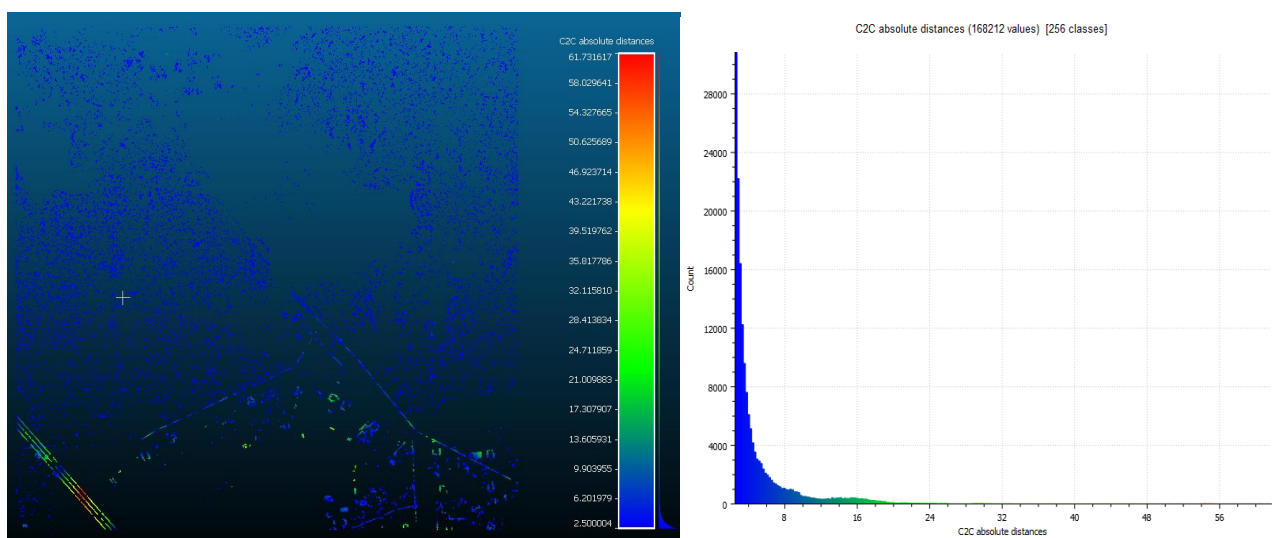
Nagrinėjant pirmojo intervalo duomenis nustatyta, kad beveik pusė taškų (9 770 277 iš 22 111 999) nuo referencinio taškų masyvo nutolę 1 cm ribose. Todėl siekiant išgauti aiškesnį duomenų pasiskirstymą, šias reikšmes turintys taškai pripažinti kaip teisingai suklasifikuoti ir buvo eliminuoti. Intervalas pakoreguotas į 0,01–2,5 m. Iš šio intervalo duomenų matyti (5.13 pav. kairėje), kad

mažiausiai nutolę taškai tolygiai pasiskirstę nagrinėjamoje teritorijoje. Didesni nuotoliai išryškėja ties apgyvendintomis zonomis bei pavienėse miško teritorijose. Iš duomenų histogramos (5.13 pav. dešinėje) matyti, kad didžiausias taškų kiekis nuo artimiausių kaimynų referenciniame taškų masyve nutolęs per 20 cm (apie 275 tūkst.).



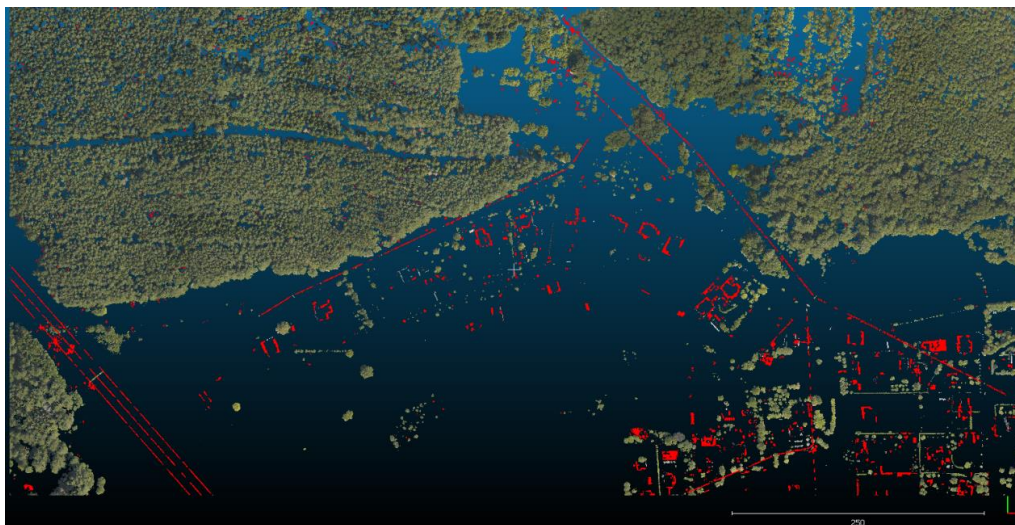
5.14 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0,01–2,5 m intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)

Iš C2C skaičiavimo rezultatų 2,5–61,73 m intervale (5.14 pav. kairėje), išryškėja *LasTools* suklasifikuotos augmenijos klasės taškai, kurie yra labiausiai nutolę nuo pradinės augmenijos klasės. Maždaug 2,5–8 m atstumu nutolę taškai (mėlyna spalva) vyrauja miško zonoje. Pagal spalvinę gamą išsiskiria elektros laidai, bei gyvenamojoje zonoje esančios sritys. Daroma prielaida, jog tai yra klaidingai suklasifikuoti objektai. Iš duomenų histogramos (5.14 pav. dešinėje) matyti, kad per 2,5–18 m nutolęs 163 843 taškas, o į didesnę nei 18 m nuotolį patenka 4 370 taškų.



5.15 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 2,5–61,73 m intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)

Didžiausių nuotolių intervalas (2,5–61,73 m) vizualiai sulyginamas su pradine augmenijos klase (5.15 pav.). Raudona spalva išskirta *LasTools* suklasifikuota augmenija. Identifikuoti klaidingai suklasifikuotų objektų tipai – elektros linijos, pastatų stogų kraštai, pavieniai žemės plotai miško teritorijoje.



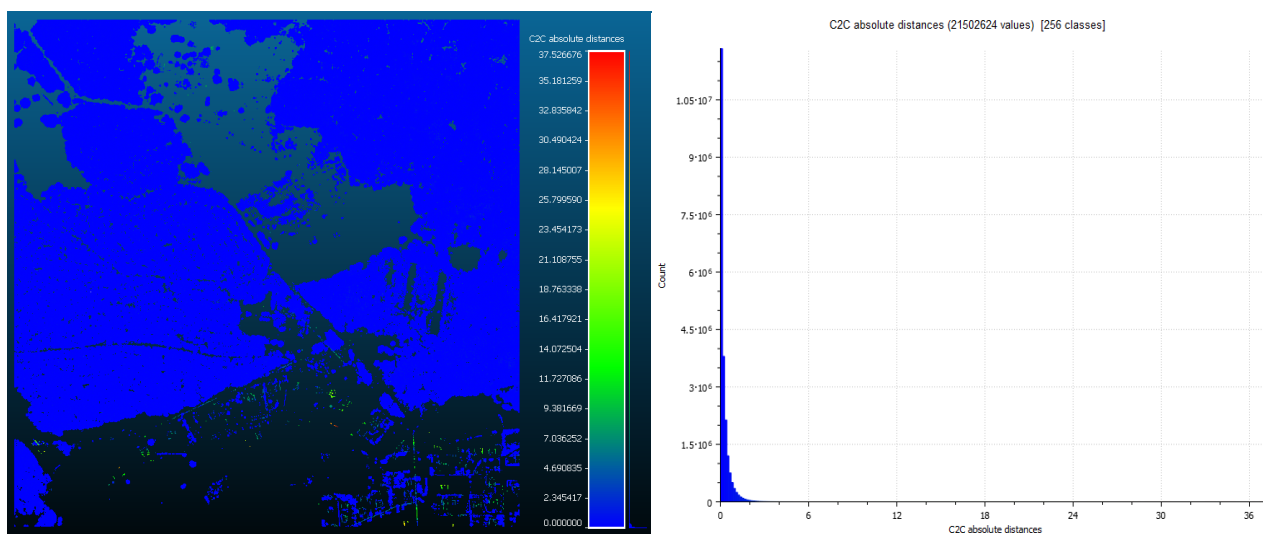
5.16 pav. Didžiausių nuotolių intervalas sugretintas su pradine augmenijos klase

LasTools suklasifikuotų augmenijos taškų atstumo iki artimiausio taško referenciniame taškų masyve, pasiskirstymas intervalais pateiktas 5.5 lentelėje. Išanalizavus duomenis nustatyta, kad taškai, nutolę per daugiau nei 3 m yra klaidingai suklasifikuoti pastatų stogai, elektros linijos ir pavieniai plotai miško žemėje. *LasTools* suklasifikuotai augmenijos klasei iš viso priskirta 22 280 215 taškų, iš jų 99,50 % suklasifikuoti teisingai, 0,50 % suklasifikuoti neteisingai.

5.5 lentelė. *LasTools* suklasifikuotų augmenijos klasės taškų pasiskirstymas atstumo intervalais

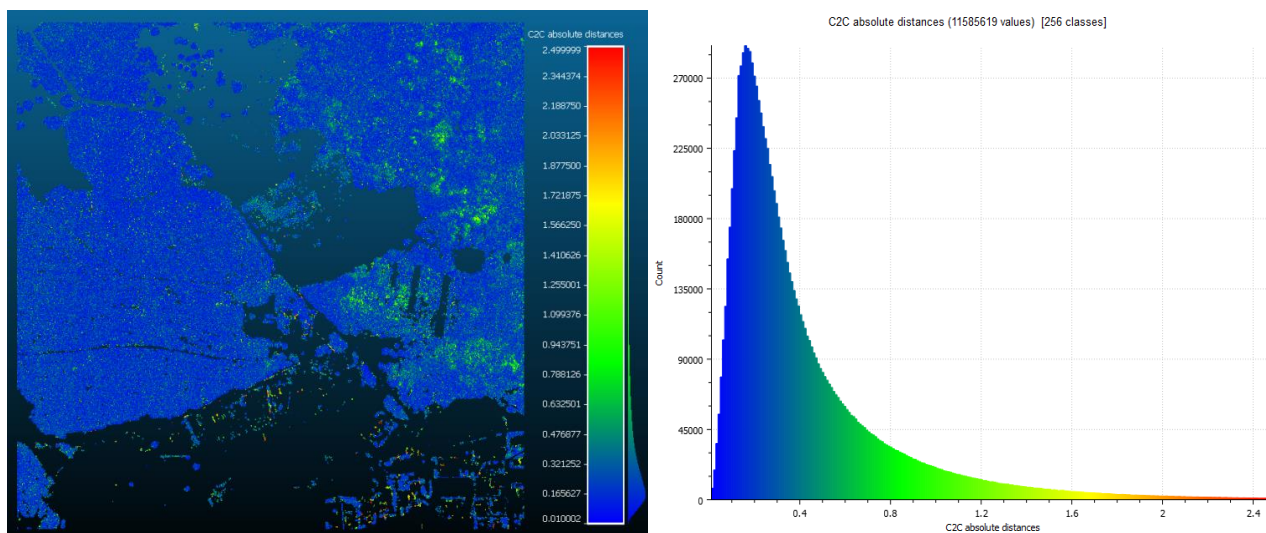
Atstumas iki artimiausio taško, referenciniame taškų masyve, m	Taškų skaičius, vnt	Taškų kiekis, %
0–0,5	18 673 121	83,81
0,5–1	2 234 606	10,04
1–2	1 068 003	4,79
2–3	192 346	0,86
Suma:	22 168 076	99,50
3–4	45 552	0,20
4–5	18 924	0,08
5–6	12 550	0,06
6–7	6 213	0,03
7–8	4 544	0,02
8–9	4 743	0,02
9–10	2 682	0,02
10–20	13 885	0,06
20–30	1 758	0,01
30–40	538	0,00
40–50	399	0,00
50–61,37	351	0,00
Suma:	112 139	0,50

Toliau su originaliais duomenimis lyginta augmenijos klasė suklasifikuota *GlobalMapper*. Pradinių duomenų augmenijos klasė parinkta kaip referencinis taškų masyvas, *GlobalMapper* suklasifikuota augmenijos klasė kaip lyginimasis taškų masyvas. Iš C2C skaičiavimų rezultatų (5.17 pav. kairėje) matyti, kad atstumas nuo *GlobalMapper* suklasifikuotos augmenijos klasės taškų iki artimiausių kaimynų referenciniame taškų masyve vyrauja nuo 0 iki 37,52 m. Didžiausi nuotoliai identifikuoti apgyvendintoje teritorijose. Iš duomenų histogramos (5.17 pav. dešinėje) nustatyta, kad didžioji dalis *GlobalMapper* suklasifikuotų taškų (21 444 857 iš 21 502 624) nuo pradinės žemės klasės nutolę taip pat per 2,5 m. Detalesnei analizei duomenys išskirti į du intervalus 0–2,5 m ir 2,5–37,52 m.



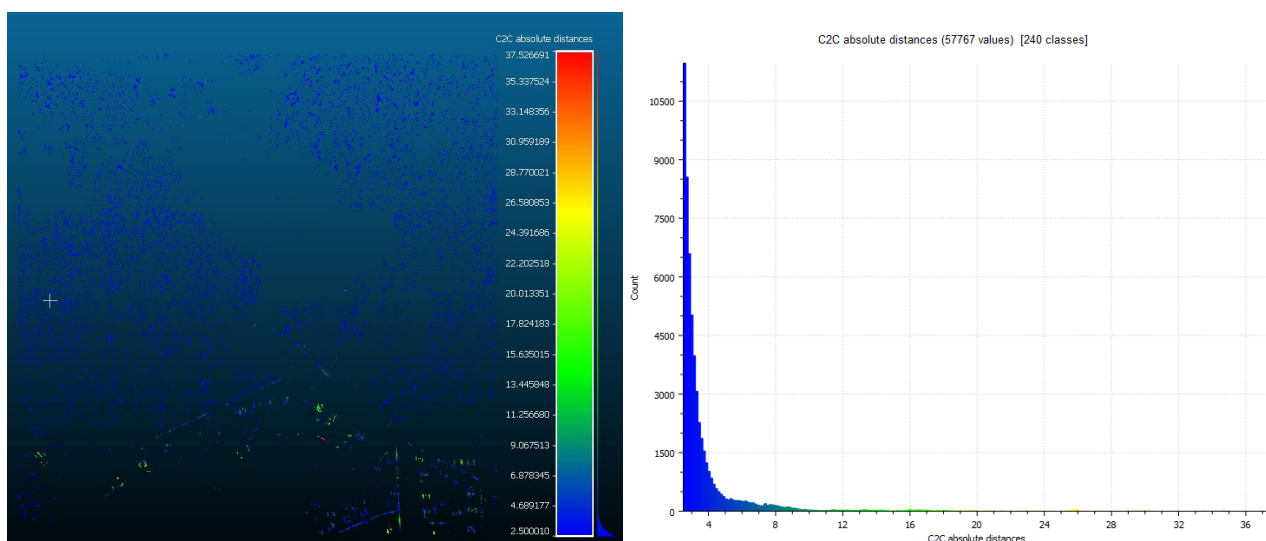
5.17 pav. C2C skaičiavimo rezultatai (kairėje), duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)

Nagrinėjant pirmojo intervalo duomenis nustatyta, didžioji dalis taškų (9 859 238 iš 21 444 857) nuo artimiausių kaimynų referenciniame taškų masyve nutolę 1 cm ribose. Todėl siekiant išgauti aiškesnį duomenų pasiskirstymą, šias reikšmes turintys taškai pripažinti kaip teisingai suklasifikuoti ir buvo eliminuoti. Intervalas pakoreguotas į 0,01–2,5 m. Iš šio intervalo skaičiavimų rezultatų (5.18 pav. kairėje) matyti, kad didesniu atstumu nutolę taškai taip pat vyrauja apgyvendintoje teritorijoje. Iš duomenų histogramos (5.18 pav. dešinėje) matyti, kad didžiausias kiekis taškų (apie 285 tūkst.) nuo pradinių duomenų nutolęs per 20 cm.



5.18 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0,01–2,5 m intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)

Iš antro intervalo (5.19 pav. kairėje) matyti, kad didžiausiu atstumu nuo pradinės augmenijos klasės nutolę taškai vyrauja apgyvendintoje zonoje. Iš duomenų histogramos (5.19 pav. dešinėje) nustatyta, kad didžioji dalis taškų (55 861) nutolę per 2,5–10 m, o į didesnę nei 10 m nuotolį patenka 1 906 taškai.



5.19 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 2,5–37,52 m intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)

Didžiausių nuotolių intervalas 2,5–37,52 m vizualiai sugretintas su pradine augmenijos klase (5.20 pav.). Raudona spalva išskirta *GlobalMapper* suklasifikuota augmenijos klasė. Išryškėja taip pat klaidingai suklasifikuotos elektros linijos bei pastatų stogai. Tačiau klaidingai suklasifikuotų objektų kiekis yra žymiai mažesnis, nei *LasTools* augmenijos klasėje.



5.20 pav. Didžiausių nuotolių intervalas sugretintas su pradine augmenijos klase

GlobalMapper suklasifikuotų augmenijos taškų atstumo iki artimiausio taško referenciniame taškų masyve, pasiskirstymas intervalais pateiktas 5.6 lentelėje. Išanalizavus duomenis nustatyta, kad taškai, nutolę per daugiau nei 3 m yra klaidingai suklasifikuoti pastatų stogai ir elektros linijos. *GlobalMapper* suklasifikuotai augmenijos klasei iš viso priskirta 21 502 624 taškai, iš jų 99,87 % suklasifikuoti teisingai, 0,13 % suklasifikuoti neteisingai.

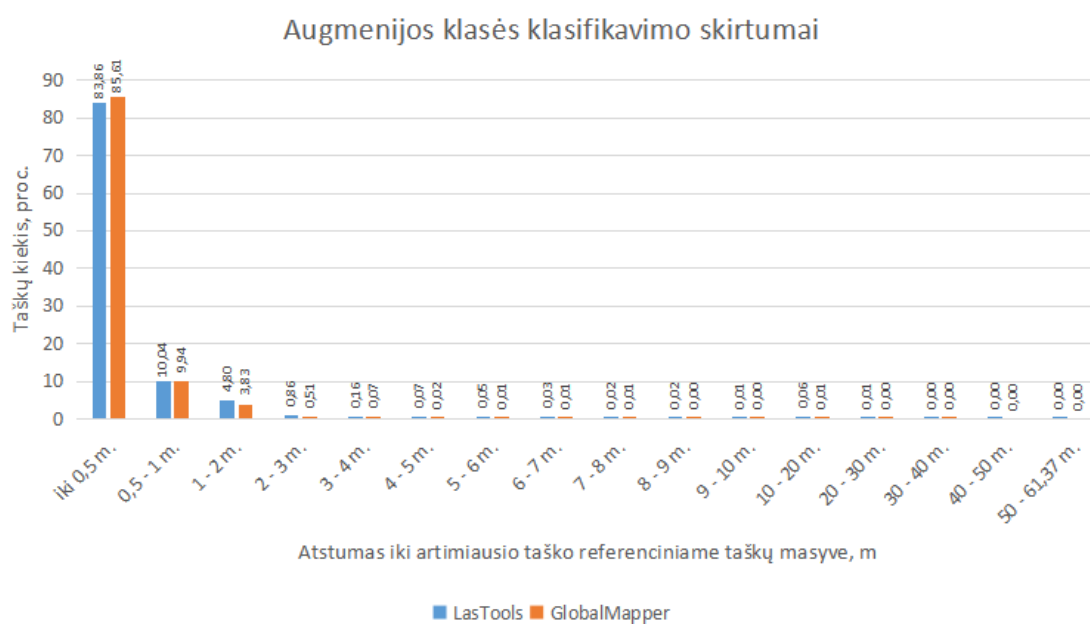
5.6 lentelė. *Global Mapper* suklasifikuotų augmenijos klasės taškų pasiskirstymas intervalais

Atstumas iki artimiausio taško, referenciniame taškų masyve, m	Taškų skaičius, vnt	Taškų kiekis, %
0–0,5	18 406 862	85,60
0,5–1	2 135 608	9,93
1–2	822 508	3,83
2–3	108 827	0,51
Suma:	21 473 805	99,87
3–4	15 990	0,07
4–5	4 757	0,02
5–6	1 950	0,01
6–7	1 982	0,01
7–8	1 108	0,01
8–9	765	0,00
9–10	361	0,00
10–20	1 522	0,01
20–30	318	0,00
30–37,52	66	0,00
Suma:	28 819	0,13

Augmenijos klasės klasifikavimo rezultatams palyginti, sudaryta stulpelinė diagrama (5.21 pav.). Kadangi skirtingomis programomis suklasifikuotų taškų skaičius skiriasi, tarpusavio rezultatams palyginti, pasirinkta procentinė taškų kiekio išraiška. Taškų kiekis procentais

skaičiuojamas nuo viso atitinkamos klasės taškų skaičiaus: *LasTools* – 22 280 213, *Global Mapper* – 21 502 624.

Diagramoje atsispindi, kokia dalis augmenijos klasės taškų procentais, patenka į atitinkamą atstumo (iki artimiausio kaimyno referenciniame taškų masyve) intervalą, išreikštą metrais. Iš diagramos matyti, kad tarpusavio programų rezultatai yra beveik vienodi. Į 0–0,5 m nuotolio intervalą patenkanti *Global Mapper* suklasifikuotų taškų dalis yra 2 % didesnė nei *LasTools*, o į didesnius 0,5–2 m atstumo nuo pradinės augmenijos klasės intervalus patenkanti *Global Mapper* suklasifikuotų taškų dalis yra maždaug 1 % mažesnė nei *LasTools*. Į didesnius nei 2 m atstumo intervalus patenkanti taškų dalis, abiejų programų klasifikavimo rezultatuose yra mažesnė nei 1 % arba lygi 0.



5.21 pav. Augmenijos klasės rezultatų palyginimo diagrama

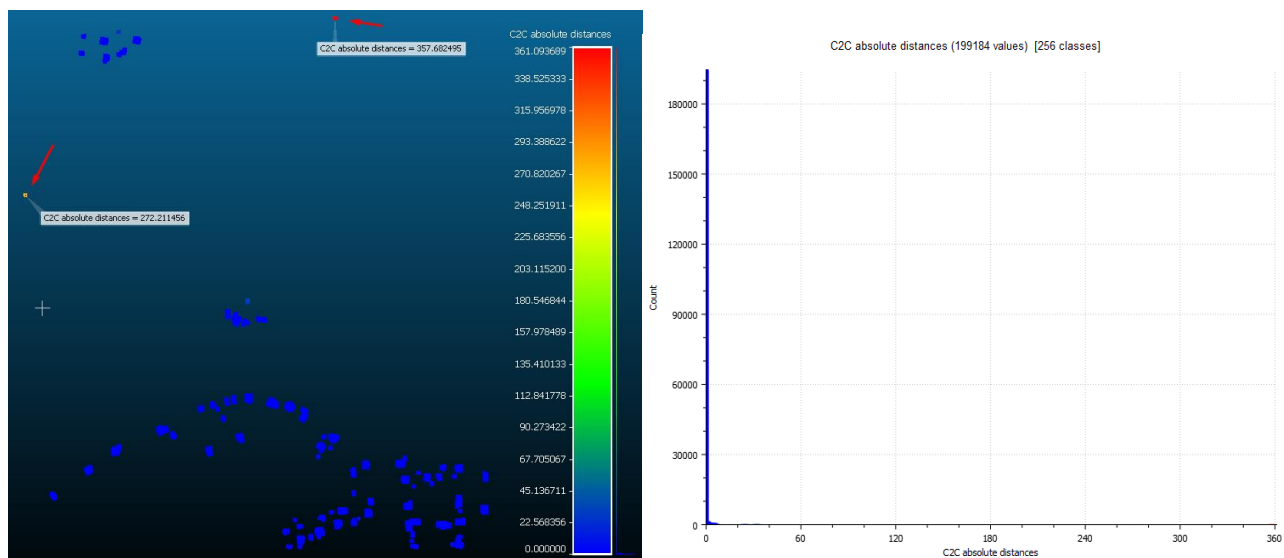
Taip pat buvo patikrinta, kokią dalį pradinės augmenijos klasės taškų atpažino abi programos. Iš 5.7 lentelės matyti, kad pradinės augmenijos klasės taškų *LasTools* programa atpažino truputį mažiau – 97,61 %, o *Global Mapper* – 98,50%. Naujai aptiktų taškų (kurių nebuvo pradinėje augmenijos klasėje) skaičius *LasTools* suklasifikuotoje augmenijos klasės yra truputį didesnis – 12,4 mln., o *Global Mapper* 11,6 mln.

5.7 lentelė. Aptiktų pradinės augmenijos klasės taškų kiekis

Programa	Teisingai suklasifikuotų taškų sk.	Pradinės augmenijos klasės taškų sk.	Aptiktų pradinės augmenijos klasės taškų sk.	Neaptiktų pradinės augmenijos klasės taškų sk.	Naujai aptiktų taškų sk.
LasTools	22 168 076	10 008 242	9 769 228 (97,61 %)	239 014 (2,39 %)	12 398 848
Global Mapper	21 473 805		9 858 324 (98,50%)	149 918 (1,50 %)	11 615 481

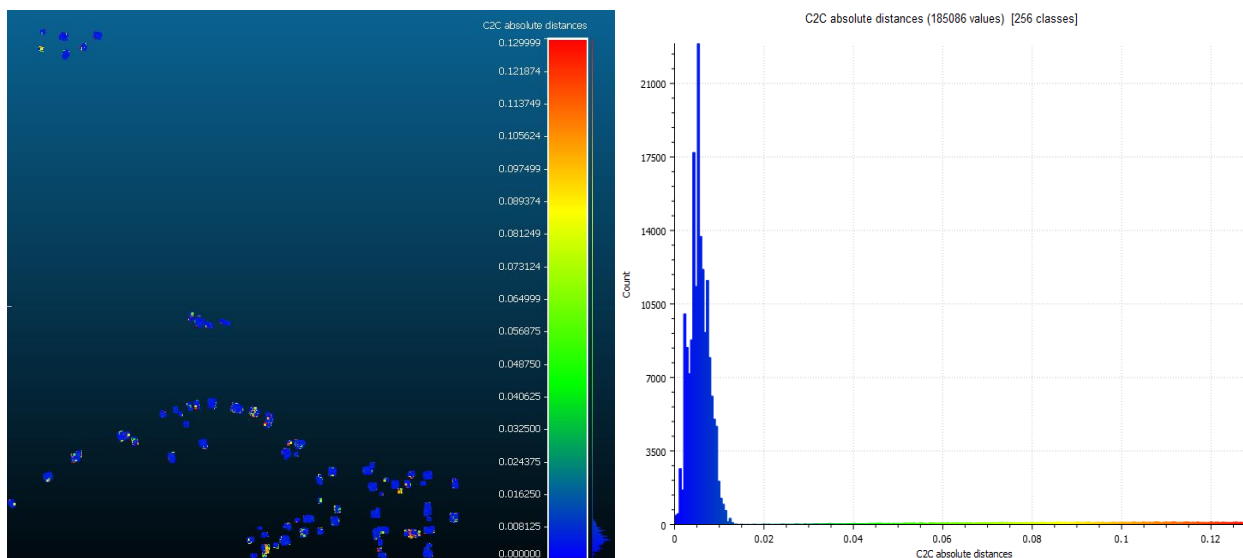
5.3. Pastatų klasės tyrimas

Su originaliais duomenimis pirmiausia palyginta pastatų klasė suklasifikuota *LasTools*. Pradinių duomenų pastatų klasė parinkta kaip referencinis taškų masyvas, *LasTools* suklasifikuota pastatų klasė kaip lyginimasis taškų masyvas. Iš C2C skaičiavimų rezultatų (5.22 pav. kairėje) matyti, kad atstumas nuo *LasTools* suklasifikuotų augmenijos klasės taškų iki artimiausių kaimynų referenciniame taškų masyve vyrauja nuo 0 iki 361,09 m. 5.22 paveikslo kairėje pažymėti du objektai, kurie yra labiausiai nutolę nuo pradinės pastatų klasės taškų. Atstumas nuo jų, iki artimiausių kaimynų referenciniame taškų masyve yra apie 272 ir 361 m. Patikrinus minėtas vietas, nustatyta, kad tai yra klaidingai suklasifikuoti medžiai. Analizuojant duomenų histogramą (5.22 pav. dešinėje) nustatyta, kad didžioji dalis *LasTools* suklasifikuotų taškų (185 086 iš 199 184) nuo pradinės pastatų klasės nutolę per 0,13 m, į 35–270 m intervalą nepatenka nei vienas taškas, o į 270–361 m intervalą patenka anksčiau minėti neteisingai suklasifikuoti medžiai (294 taškai). Detalesnei analizei išskirti 0–0,13 m ir 0,13–35 m atstumo intervalai.



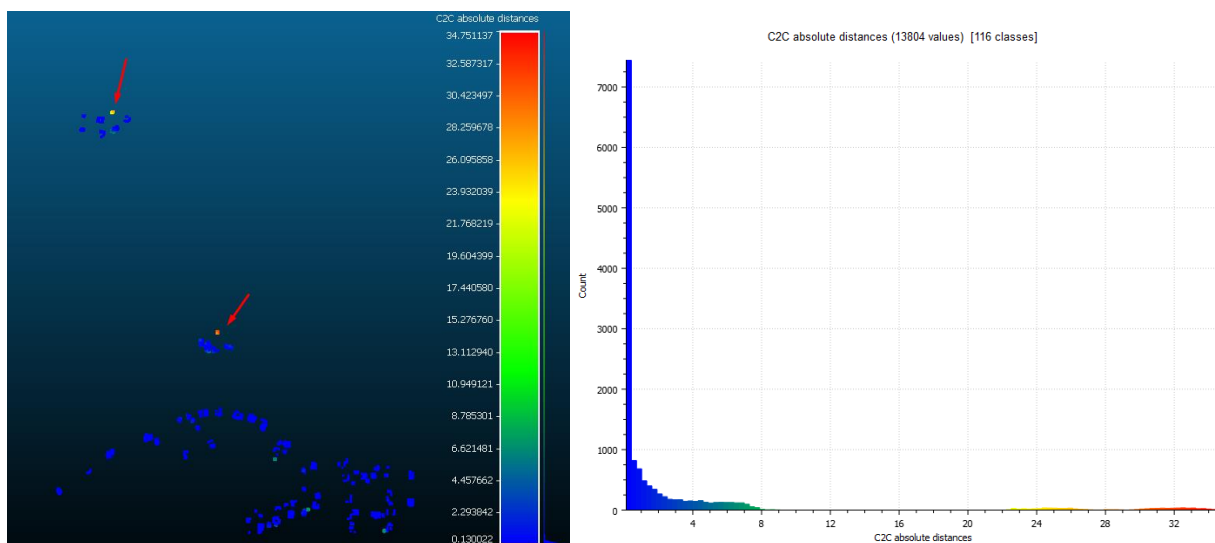
5.22 pav. C2C skaičiavimo rezultatai (kairėje), duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)

Iš pirmojo 0–0,13 m intervalo duomenų (5.23 pav. kairėje) dėsningų skirtumų nematyti. Iš duomenų histogramos (5.23 pav. dešinėje), nustatyta, kad didžioji dalis intervalo taškų nutolusi per mažiau nei 2 cm (167 617 iš 185 086).



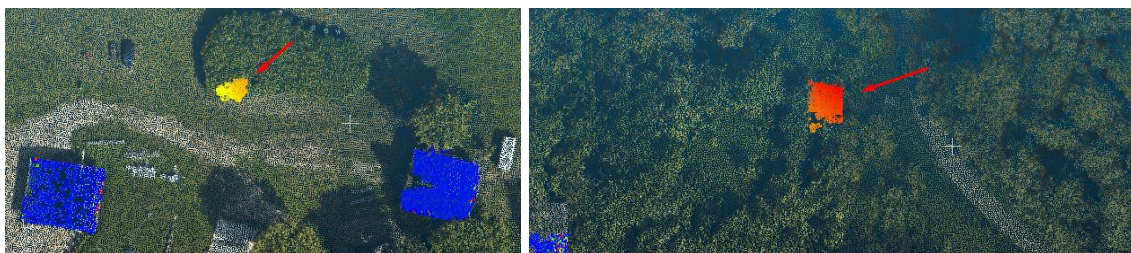
5.23 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0,0–0,13 m intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)

Antrajame intervale išsiskiria rodyklėmis pažymėtos vietos (5.24 pav. kairėje), nutolusios didžiausiu atstumu. Iš histogramos (5.24 pav. dešinėje) nustatyta, jog jos nutolusios 24 ir 32 m atstumu.



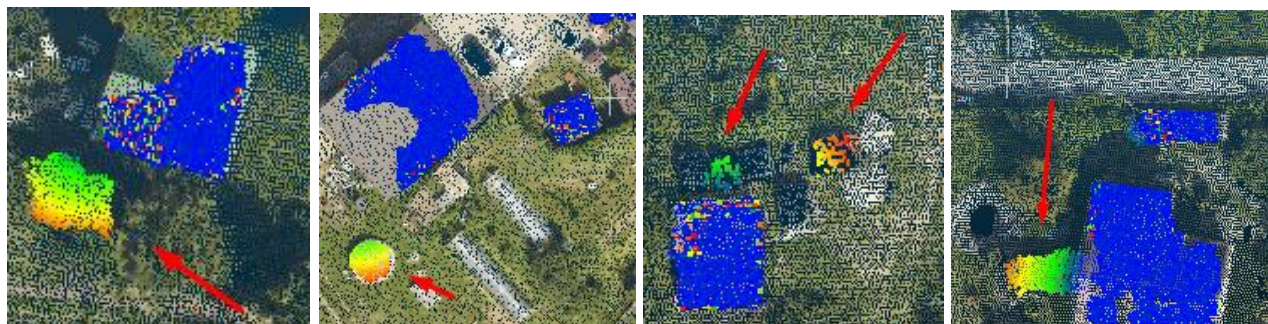
5.24 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0,13–35,0 m intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)

Patikrinus minėtas vietas identifikuoti klaidingai suklasifikuoti medžiai ir krūmai (5.25 pav.).



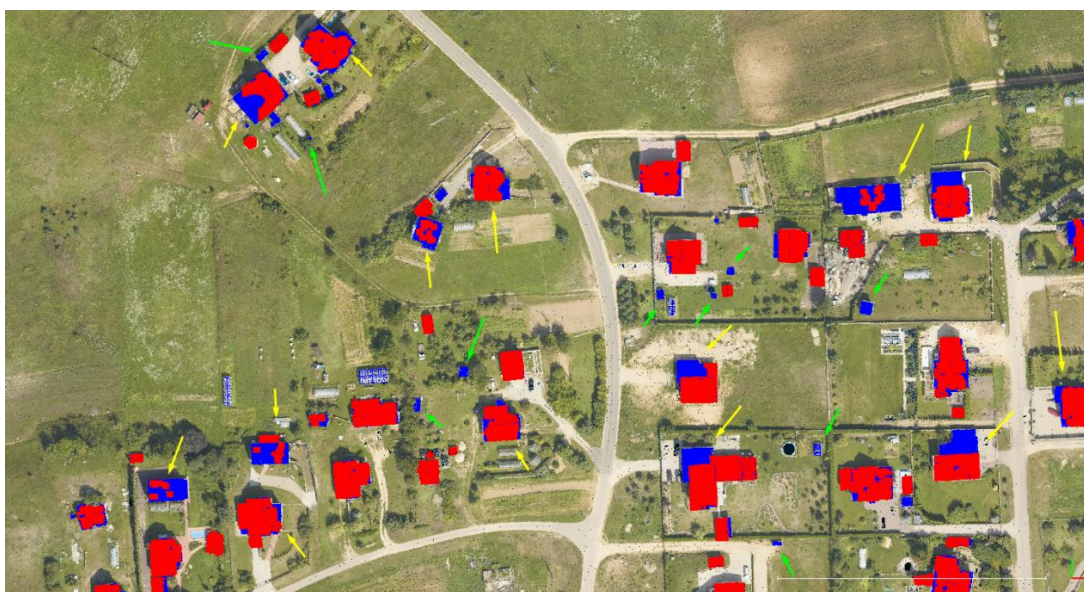
5.25 pav. Identifikuoti klaidingai suklasifikuoti objektai

Kadangi iš duomenų histogramos (5.24 pav. dešinėje), matyti, kad į 2–9 m atstumo intervalą patenka palyginti nedidelė dalis taškų (2 744 iki 13 804), šios vietos patikrintos vizualiai. 5.26 paveiksle pateiktuose tikrinimo fragmentuose matyti, kad į šį intervalą patenka klaidingai suklasifikuoti, šalia pastatų esantys nedideli objektai (baseinas, mašina, augmenija).



5.26 pav. Taškai nuo pradinės pastatų klasės nutolę 2–9 m atstumu

Taip pat vizualiai sugretintos (5.27 pav.) pradinė (išskirta mėlyna spalva) ir *LasTools* suklasifikuota (išskirta raudona spalva) pastatų klasės. Matoma tendencija, kad *LasTools* prastai atpažįsta pastatų stogų kraštus (situacijos pažymėtos geltonomis rodyklėmis), bei nesuklasifikuoja nedidelių pastatų (situacijos pažymėtos žaliomis rodyklėmis).



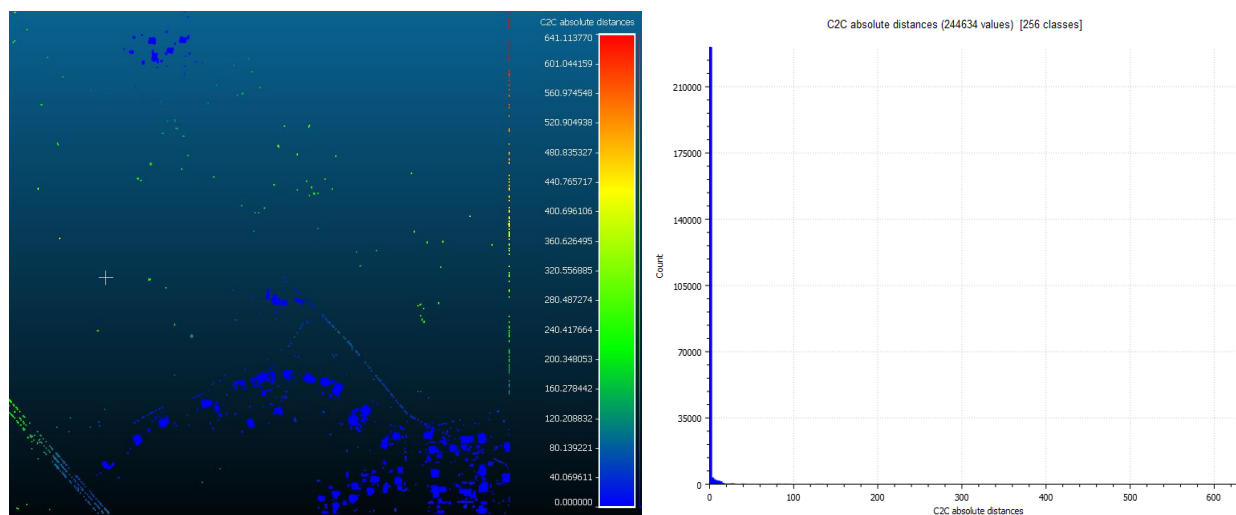
5.27 pav. Sugretintos pradinė (mėlynas spalva) ir *LasTools* (raudona spalva) pastatų klasės

LasTools suklasifikuotų pastatų klasės taškų atstumo iki artimiausio taško referenciniame taškų masyve, pasiskirstymas intervalais pateiktas 5.8 lentelėje. Išanalizavus duomenis nustatyta, kad taškai, nutolę per daugiau nei 2 m yra klaidingai suklasifikuoti medžiai ir netoli pastatų esantys objektai (baseinas, mašina, krūmai). *LasTool* suklasifikuotai pastatų klasei iš viso priskirti 199 184 taškai, iš jų 98,07 % suklasifikuoti teisingai, 1,93 % suklasifikuoti neteisingai.

5.8 lentelė. *LasTools* suklasifikuotų pastatų klasės taškų pasiskirstymas intervalais

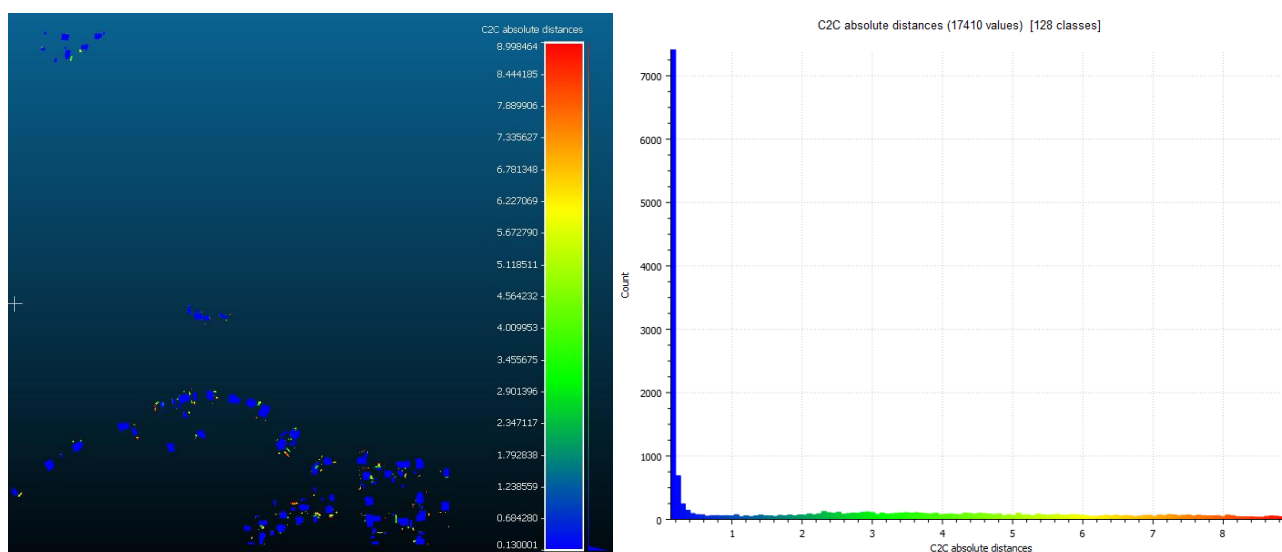
Atstumas iki artimiausio taško, referenciniame taškų masyve, m	Taškų skaičius, vnt	Taškų kiekis, %
0–0,5	169 801	85,25
0,5–0,1	8 907	4,47
0,1–0,15	9 779	4,91
0,15–0,2	2703	1,36
0,2–0,5	1 545	0,78
0,5–1	1 346	0,68
1–2	1 254	0,63
Suma:	195 335	98,07
2–3	700	0,35
3–4	572	0,29
4–5	459	0,23
5–6	402	0,20
6–7	399	0,20
7–8	199	0,10
8–9	13	0,01
22–34	811	0,41
270–361	294	0,15
Suma:	3 849	1,93

Toliau su originaliais duomenimis lyginta pastatų klasė suklasifikuota *Global Mapper*. Pradinių duomenų pastatų klasė parinkta kaip referencinis taškų masyvas, *Global Mapper* suklasifikuota pastatų klasė kaip lyginimasis taškų masyvas. Iš C2C skaičiavimų rezultatų (5.28 pav. kairėje) matyti, kad atstumas nuo *Global Mapper* suklasifikuotų pastatų klasės taškų iki artimiausių kaimynų referenciniame taškų masyve vyrauja nuo 0 iki 641,11 m. 5.28 paveikslo kairėje matyti, jog pastatų klasei priskirta nemaža dalis taškų, esančių miško zonoje, elektros linijos, eilė taškų teritorijos dešiniame pakraštyje. Dėl šių klaidingai suklasifikuotų objektų matomas itin išplėstas C2C atstumo intervalas. Išanalizavus duomenų pasiskirstymo histogramą (5.29 pav.), nustatyta, kad į mažiausio 0–0,13 m atstumo intervalą patenka didžioji dalis taškų (218 693 iš 244 634), jie pripažinti kaip teisingai suklasifikuoti. Likę duomenys detalesnei analizei išskirti į du intervalus 0,13–9 m ir 9–641 m.



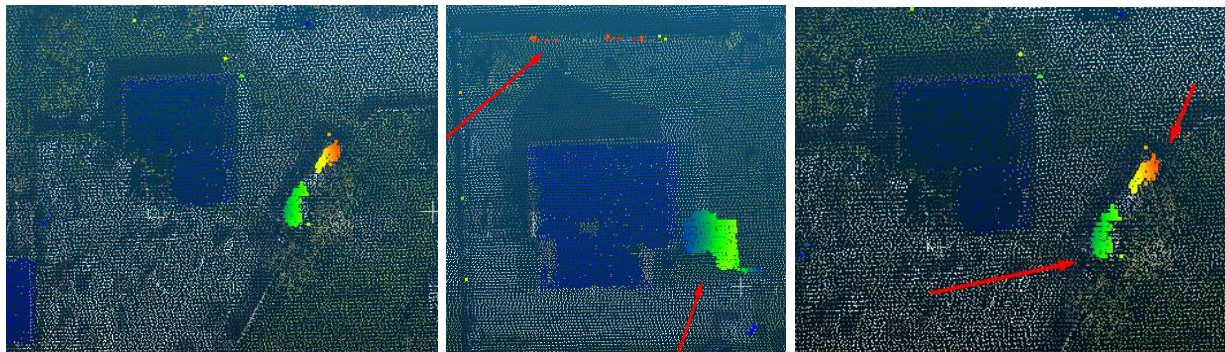
5.28 pav. C2C skaičiavimo rezultatai (kairėje), duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)

Iš pirmojo intervalo duomenų histogramos (5.29 pav. dešinėje) matyti, kad didžioji dalis taškų nutolusi maždaug 2 m ribose. Likę duomenys pasiskirstę tolygiai.

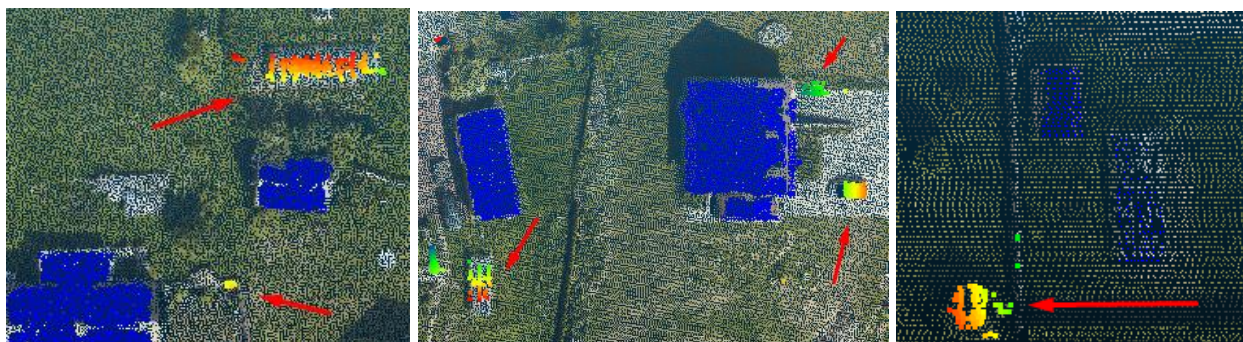


5.29 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0,13–9 m intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)

Vizualiai patikrintos vietos, kuriose taškai nuo pradinių duomenų pastatų klasės nutolę per 2–9 m. Iš 5.30 ir 5.31 paveiksluose pateiktų tikrinimo fragmentų matyti, kad tai šalia pastatų esantys nedideli objektai (baseinas, mašina, augmenija, šiltnamiai).

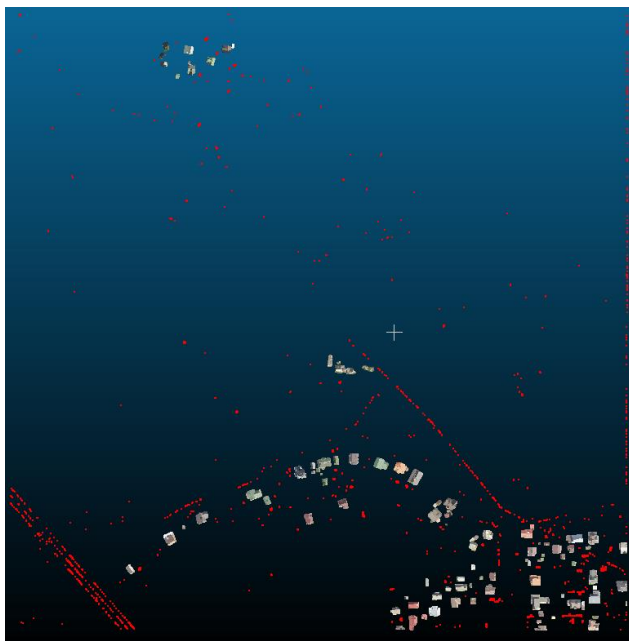


5.30 pav. Taškai nuo pradinių duomenų pastatų klasės nutolę per 2–9 m atstumu



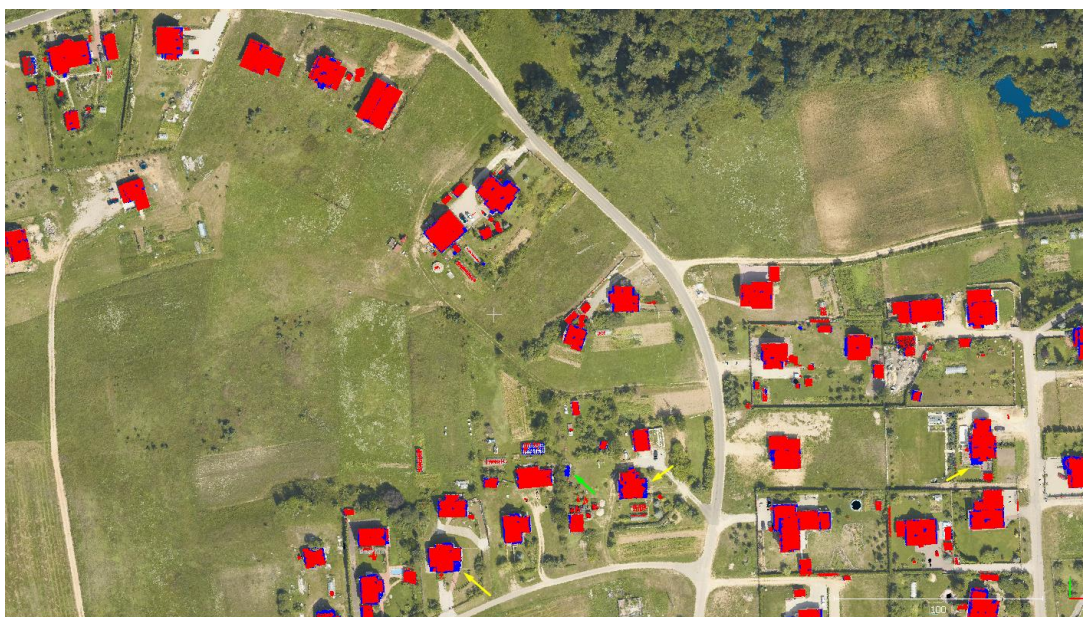
5.31 pav. Taškai nuo pradinių duomenų pastatų klasės nutolę per 2–9 m atstumu

Didžiausių nuotolių, 9–641 m intervalas, kurį sudaro 6 971 taškas, suligintas su pradine pastatų klase (5.32 pav.). Raudona spalva išskirti *Global Mapper* taškai. Identifikuoti klaidingai suklasifikuoti elektros linijų laidai, pavienės šiukšlės miško teritorijoje, objektai netoli pastatų (pvz.: krūmai, medžiai).



5.32 pav. Didžiausių nuotolių intervalas sugretintas su pradine pastatų klase

Taip pat vizualiai sugretintos (5.33 pav.) pradinė (išskirta mėlyna spalva) ir *Global Mapper* suklasifikuota (išskirta raudona spalva) pastatų klasės. Pastebėta, kad pastatų kraštai neatpažinti tik pavieniais atvejais (situacijos pažymėtos geltonomis rodyklėmis) ir yra suklasifikuoti teisingiau nei su *LasTools*. Taip pat *Global Mapper* geriau atpažįsta nedidelius pastatus, kadangi tik vienas nedidelis pastatas, pažymėtas mėlyna rodykle, nebuvo priskirtas pastatų klasei.



5.33 pav. Sugretintos originali (mėlyna spalva) ir *Global Mapper* (raudona spalva) pastatų klasės

Global Mapper suklasifikuotų pastatų klasės taškų atstumo iki artimiausio taško referenciniame taškų masyve, pasiskirstymas intervalais pateiktas 5.9 lentelėje. Išanalizavus duomenis nustatyta, kad taškai, nutolę per daugiau nei 2 m yra klaidingai suklasifikuoti medžiai ir netoli pastatų esantys objektai (baseinas, mašina, šiltnamiai, krūmai). *Global Mapper* suklasifikuotai pastatų klasei iš viso priskirti 244 634 taškai, iš jų 94,08 % suklasifikuoti teisingai, 5,92 % suklasifikuoti neteisingai.

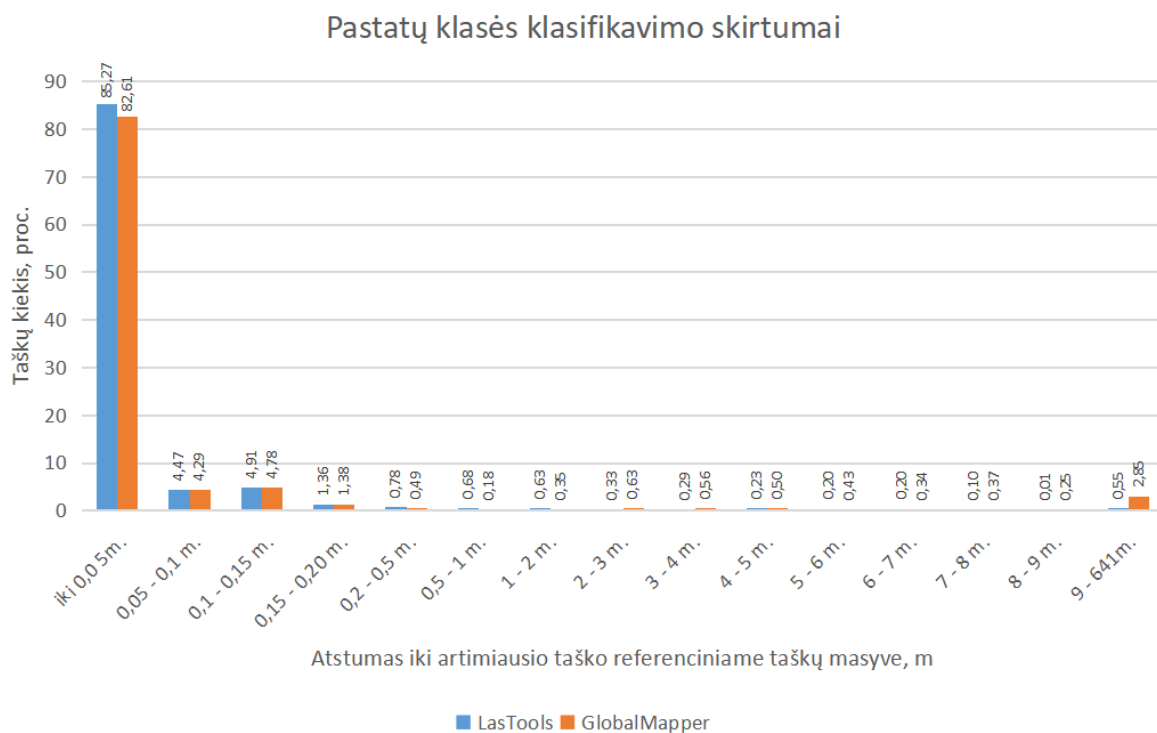
5.9 lentelė. *Global Mapper* suklasifikuotų pastatų klasės taškų pasiskirstymas intervalais

Atstumas iki artimiausio taško, referenciniame taškų masyve, m	Taškų skaičius, vnt	Taškų kiekis, %
0–0,05	202 099	82,61
0,05–0,1	10 494	4,29
0,1–0,15	11 698	4,78
0,15–0,2	3 385	1,38
0,2–0,5	1 189	0,49
0,5–1	435	0,18
1–2	861	0,35
Suma:	230 161	94,08
2–3	1 537	0,62
3–4	1 365	0,56
4–5	1 225	0,50
5–6	1 041	0,43
6–7	831	0,34
7–8	902	0,37
8–9	601	0,25
9–641	6 971	2,85
Suma:	14 473	5,92

Pastatų klasės klasifikavimo rezultatams palyginti, sudaryta stulpelinė diagrama (5.34 pav.). Kadangi skirtingomis programomis suklasifikuotų taškų skaičius skiriasi, tarpusavio rezultatams palyginti, pasirinkta procentinė taškų kiekio išraiška. Taškų kiekis procentais skaičiuojamas nuo viso atitinkamos klasės taškų skaičiaus: *LasTools* – 198 079, *GlobalMapper* – 237 663.

Diagramoje atsispindi, kokia dalis augmenijos klasės taškų procentais, patenka į atitinkamą atstumo (iki artimiausio kaimyno referenciniame taškų masyve) intervalą, išreikštą metrais. Iš diagramos matyti, kad tarpusavio programų rezultatai neturi žymių skirtumų. Į mažiausią atstumo intervalą 0–5 cm patenkanti *LasTools* (mėlynas stulpelis) klasifikuotų taškų dalis yra 3 % didesnė, nei klasifikuotų *GlobalMapper* (oranžinis stulpelis) programa. Į kitus intervalus nuo 0,05 iki 0,20 m patenkančių taškų kiekis abiejose programose skiriasi per mažiau nei 1 %. Į kiekvieną likusį intervalą nuo 0,2 iki 9 m abiejų programų rezultatuose patenka mažiau nei 1 % taškų. Išsiskiria didžiausią atstumą (9–641 m) nuo pradinių duomenų žymintis intervalas, į kurį patenka klaidingai suklasifikuoti

objektai. *LasTools* klasifikuotų taškų dalis, patenkanti į šį intervalą sudaro 0,55 % tuo tarpu *GlobalMapper* 2,85 %.



5.34 pav. Augmenijos klasės rezultatų palyginimo diagrama

Taip pat buvo patikrinta, kokią dalį pradinės pastatų klasės taškų atpažino abi programos. Iš 5.10 lentelės matyti, kad pradinės pastatų klasės taškų *LasTools* programa atpažino mažiau – 66,88 %, o *Global Mapper* – 81,55 %. Naujai aptiktų taškų (kurių nebuvo pradinėje žemes klasėje) skaičius tiek *LasTools* suklasifikuotoje pastatų klasėje – 31,8 tūkst., *Global Mapper* – 30,8 tūkst.

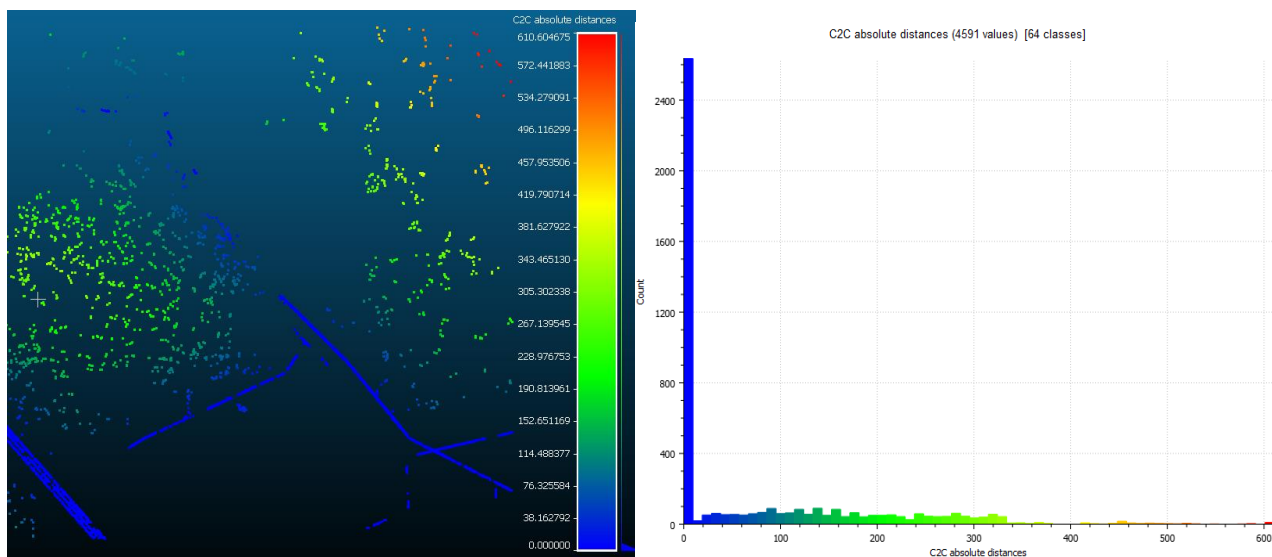
5.10 lentelė. Aptiktų pradinės pastatų klasės taškų kiekis

Programa	Teisingai suklasifikuotų taškų sk.	Pradinės žemes klasės taškų sk.	Aptiktų pradinės žemes klasės taškų sk.	Neaptiktų pradinės žemes klasės taškų sk.	Naujai aptiktų taškų sk.
LasTools	195 335	244 418	163 459 (66,88 %)	80 959 (33,12 %)	31 876
Global Mapper	230 161		199 321 (81,55 %)	45 097 (18,45 %)	30 840

5.4. Elektros klasės tyrimas

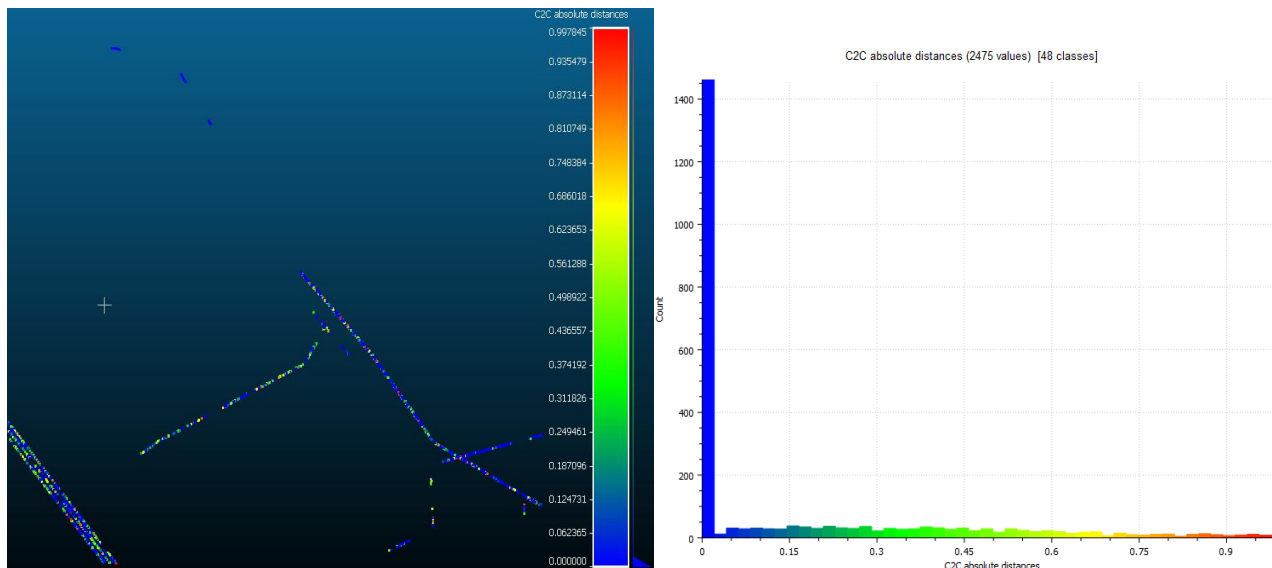
Elektros laidų klasifikavimas galimas tik viena iš trijų – *GlobalMapper* programa. Pradinių duomenų elektros klasė parinkta kaip referencinis taškų masyvas, *Global Mapper* suklasifikuota elektros klasė kaip lyginimasis taškų masyvas. Iš C2C skaičiavimų rezultatų (5.35 pav. kairėje) matyti, kad atstumas nuo *Global Mapper* suklasifikuotų elektros klasės taškų iki artimiausių kaimynų referenciniame taškų masyve vyrauja 0–610,60 m intervale. Išanalizavus duomenų pasiskirstymą

nustatyta, kad didžioji dalis *GlobalMapper* suklasifikuotų elektros klasės taškų (53,9 %) nuo pradinių elektros klasės taškų nutolę 1 m ribose. Atsižvelgiant į vizualiai matomą didelį klasifikavimo šiukšlių kiekį detalesnei analizei duomenys išskirti į du intervalus: 0–1 m ir 1–610,60 m.



5.35 pav. C2C skaičiavimo rezultatai (kairėje), duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)

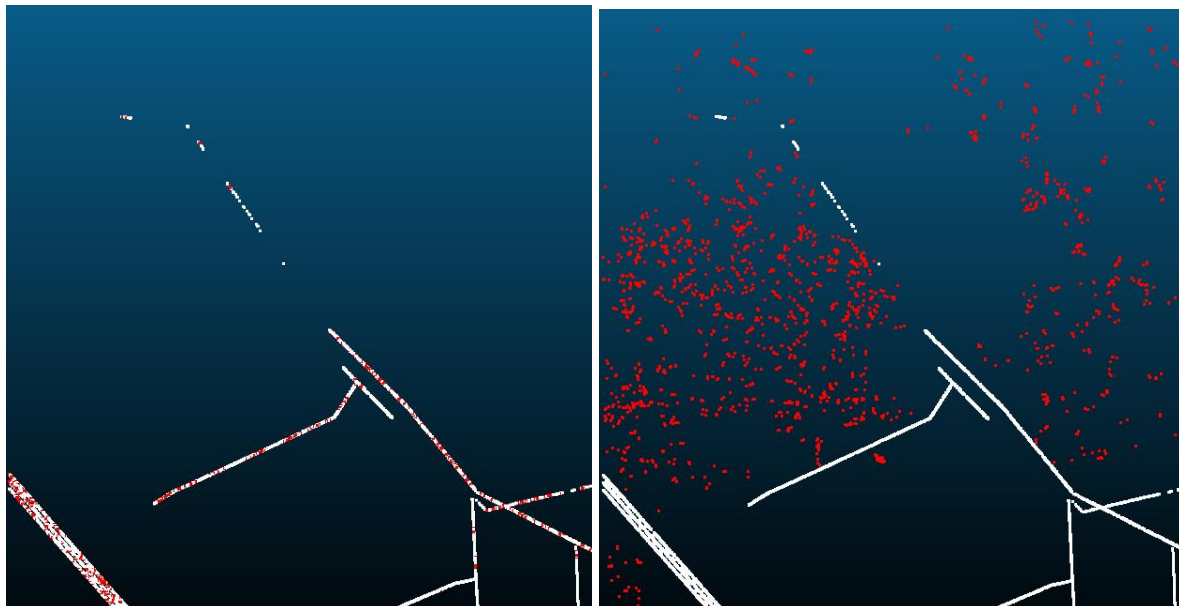
Iš pirmo intervalo histogramos (5.36 pav. dešinėje) nustatyta, kad per 2 cm atstumą nutolęs 1 461 taškas, likę taškai tolygiai išsidėstę likusioje intervalo dalyje. Iš 2C2 skaičiavimo rezultatų (5.36 pav. kairėje) matyti, kad klaidingai suklasifikuotų taškų šiame intervale nėra.



5.36 pav. C2C skaičiavimo rezultatai 0,0–1,0 m intervale (kairėje), intervalo duomenų pasiskirstymo histograma (dešinėje)

Nagrinėjant antrąjį intervalą, nustatyta, kad į jį patenkantys taškai yra suklasifikuoti klaidingai ir elektros linijoms nepriklauso. Abiejų intervalų duomenys vizualiai sugretinti su pradinės elektros klasės taškais. 5.37 paveikslo kairėje raudona spalva žymi 0–1 m intervalo taškus, balta spalva pradinę elektros klasę. Matyti, kad už pradinių taškų ribos nepatenka nei vienas 0–1 m intervalo

taškas, todėl galima daryti išvadą, jog visi į šį intervalą patenkantys taškai tikrai priklauso elektros klasei. 5.37 paveikslo dešinėje raudona spalva žymi 1–610,60 m intervalo taškus, balta spalva pradinę elektros klasę. Matyti, kad į pradinių elektros klasės taškų zoną nepatenka nei vienas intervalo taškas, todėl galima daryti išvadą, kad į šį intervalą patenkantys *GlobalMapper* elektros klasės taškai yra suklasifikuoti klaidingai. Šis intervalas sudaro 46,1 % visų elektros klasės taškų.



5.37 pav. Sugretinti pradinės ir *Global Mapper* elektros klasių taškai. Balta spalva išskirta pradinė elektros klasė, raudona – *Global Mapper* 0–1 m (kairėje) ir 1–610,60 m (dešinėje) intervalų taškai

Global Mapper suklasifikuotų elektros klasės taškų atstumo iki artimiausio taško referenciniame taškų masyve, pasiskirstymas intervalais pateiktas 5.11 lentelėje. Išanalizavus duomenis nustatyta, kad taškai, nutolę per daugiau nei 1 m yra klaidingai suklasifikuoti medžiai. *Global Mapper* suklasifikuotai elektros klasei iš viso priskirtas 4 591 taškas, iš jų 53,90 % suklasifikuoti teisingai, 46,10 % suklasifikuoti neteisingai.

5.11 lentelė. *Global Mapper* suklasifikuotų elektros klasės taškų pasiskirstymas 0–1 m intervale

Atstumas iki artimiausio taško, referenciniame taškų masyve, m	Taškų skaičius, vnt	Taškų kiekis, %
0–0,02	1 461	31,82
0,02–0,1	103	2,24
0,1–0,2	160	3,49
0,2–0,3	157	3,42
0,3–0,4	153	3,33
0,4–0,5	128	2,79
0,5–0,6	96	2,09
0,6–0,7	78	1,70
0,7–0,8	57	1,24
0,8–0,9	46	1,00
0,9–1	36	0,78
	Suma:	53,90

1-2	125	2,73
2-3	15	0,33
3-4	10	0,22
4-5	5	0,11
5-610,60	1961	42,71
	Suma:	46,10

Taip pat buvo patikrinta, kokią dalį pradinės elektros klasės taškų atpažino *Global Mapper* programa. Iš 5.12 lentelės matyti, kad pradinės elektros klasės taškų *Global Mapper* programa atpažino 74,78 %, neatpažino 25,22 %. Naujai aptiko 1 015 taškų.

5.12 lentelė. Aptiktų pradinės elektros klasės taškų kiekis

Programa	Teisingai suklasifikuotų taškų sk.	Pradinės elektros klasės taškų sk.	Aptiktų pradinės elektros klasės taškų sk.	Neaptiktų pradinės elektros klasės taškų sk.	Naujai aptiktų taškų sk.
Global Mapper	2 475	5 790	1 460 (74,78 %)	4 330 (25,22 %)	1 015

IŠVADOS

1. Apžvelgtas oro LiDAR veikimo principas. Nustatyta, kad oro LiDAR išskiriamas į du pagrindinius tipus: topografinį ir batimetrinį. Darbe naudoti iš oro gauti topografinio LiDAR tipo duomenys.
2. Apžvelgtas LiDAR duomenų LAS formatas. Nustatyta, kad šio formato failus sudaro keturios dalys: duomenų antraštės blokas, kintamo ilgio įrašai, taškinių duomenų įrašai ir išplėstiniai kintamo ilgio įrašai.
3. Apžvelgta klasifikuoti naudotų programų, veikimo principų teorinė dalis. Nustatyta kad duomenų klasifikavimas atliekamas dviem etapais: atskiriami žemės ir ne žemės taškai, tuomet atliekamas ne žemės taškų klasifikavimas. Nustatyti programose naudojami klasifikavimo metodai:
 - a) žemės taškams klasifikuoti *LasTools* naudojamas laipsniškas TIN tankinimo metodas, *CloudCompare* – audinio modeliavimo filtro (CSF) metodas, *Global Mapper* – daugiamastelinio kreivumo (MCC) klasifikavimo metodas;
 - b) ne žemės taškams klasifikuoti *LasTools* naudojamas algoritmas pagrįstas kaimyninių taškų suradimu, *Global Mapper* – segmentacijos metodu. *Cloud Compare* ne žemės taškų klasifikavimas neatliekamas.
4. Atliktas duomenų klasifikavimas:
 - a) po *LasTools* atlikto klasifikavimo gautos žemės, augmenijos ir pastatų klasės, po *Global Mapper* – žemės, augmenijos, pastatų ir papildoma elektros klasė, po *CloudCompare* – žemės ir ne žemės taškų klasės, detalesnis klasifikavimas programoje negalimas.
 - b) žemės klasės klasifikavimo trukmė: *LasTools* 11 min, *Global Mapper* 10 min, *CloudCompare* 4 m.
 - c) ne žemės taškų klasifikavimo trukmė: *LasTools* 25 min, *Global Mapper* 17 min.
5. Įvertinti klasifikavimo rezultatai:
 - a) žemės klasė tiksliausiai suklasifikuota su *GlobalMapper* – 99,85 % taškų suklasifikuoti teisingai (*LasTools* – 99,71 %, *CloudCompare* – 99,80 %). Vyraujantys klaidų tipai: pastatų stogai, medžiai. Daugiausiai pradinės žemės klasės taškų atpažino *GlobalMapper* – 99,76 % (*LasTools* – 79,78%, *CloudCompare* – 99,05 %).
 - b) augmenijos klasė tiksliausiai suklasifikuota su *GlobalMapper* – 99,87 % taškų suklasifikuoti teisingai (*LasTools* – 99,50 %, *CloudCompare* klasifikavimas negalimas). Vyraujantys klaidų tipai – elektros linijos, pastatų stogų kraštai. Daugiausiai pradinės augmenijos klasės taškų atpažino *GlobalMapper* – 98,50 % (*LasTools* – 97,61 %);
 - c) pastatų klasė tiksliau suklasifikuota su *GlobalMapper*. Nors, su *LasTools* teisingai suklasifikuotų taškų dalis didesnė – 98,07 % (*GlobalMapper* – 94,08 %), tačiau vizualiai,

- Global Mapper* geriau atpažino pastatų stogų kraštus ir nedidelius pastatus. Vyraujantys klaidų tipai – medžiai, krūmai, šalia pastatų esantys automobiliai, baseinas. Daugiausiai pradinės pastatų klasės taškų atpažino *GlobalMapper* – 81,55 % (*LasTools* – 66,88 %);
- d) elektros klasė klasifikuota tik su *Global Mapper* programa. Teisingai suklasifikuotų taškų dalis – 53,90 %. Vyraujantis klaidų tipas – medžiai miško teritorijoje. Atpažintų pradinės elektros klasės taškų dalis – 74,78 %.

Literatūros šaltiniai

1. Rapidlasso. (n.d. a). Lasground. Prieiga per internetą: <https://rapidlasso.com/lastools/lasground/>
2. ISPRS. (n.d.). Filtering algorithm. Prieiga per internetą: <http://lbi-archpro.org/als-filtering/lbi-project/results/lastools/filtering-algorithm-2>
3. Cloudcompare. (n.d.). CFS plugin. General parameters. Prieiga per internetą: [https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=CSF_\(plugin\)#Advanced_parameters](https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=CSF_(plugin)#Advanced_parameters)
4. Rapidlasso. (n.d. b). Lasclassify. Prieiga per internetą: <https://rapidlasso.com/lastools/lasclassify/>
5. Melin, M.; Shapiro, A. & Glover-Kapfer, P. (2017). Lidar for ecology and conservation. *WWF Conservation Technology Series* 1(3). WWF-UK, Woking, United Kingdom
6. Lohani, B. (2015). Airborne altimetric LIDAR: Principle, data collection, processing and applications. *Department of Civil Engineering, India*.
7. Shan, J. & Toth, C. K. (2018). *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. CRC press.
8. Weil, J. (1986). The synthesis of cloth objects. *ACM Siggraph Computer Graphics*, 20(4), 49-54.
9. Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., & Yan, G. (2016). An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. *Remote Sensing*, 8(6), 501.
10. ASPRS (American Society for Photogrammetry & Remote Sensing). (2019, March). *LAS Specification Version 1.4–R14*. In American Society for Photogrammetry & Remote Sensing.
11. Vosselman, G. & Maas, H. G. (2010). *Airborne and terrestrial laser scanning*. CRC press.
12. Assi, A. (2016). Light Detection And Ranging. *4th year seminar, Syrian Arab Republic*
13. Dong, P. & Chen, Q. (2018). *LiDAR remote sensing and applications*. CRC Press.
14. Evans, J. S., & Hudak, A. T. (2007). A multiscale curvature algorithm for classifying discrete return LiDAR in forested environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(4), 1029-1038.
15. Bluemarblegeo. (n.d. a). Auto-classify non-ground lidar points. Prieiga per internetą: https://www.blumarblegeo.com/knowledgebase/global-mapper-22/Lidar_Module/AutoClassify_NonGround.htm
16. Turton, D. A. (2006). Factors Influencing ALS Accuracy.
17. AAMHatch, 2006. Airborne Laser Scanning Technical Specifications.

18. Quadros, N. D., Collier, P. A. & Fraser, C. S. (2008). Integration of bathymetric and topographic LiDAR: a preliminary investigation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, 1299-1304.
19. Cloudcompare. (n.d.). Distance computation. Prieiga per internetą: https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Distances_Computation
20. Hilker, T., Coops, N. C., Newnham, G. J., van Leeuwen, M., Wulder, M. A., Stewart, J. ir Culvenor, D. S. (2012). Comparison of terrestrial and airborne LiDAR in describing stand structure of a thinned lodgepole pine forest. *Journal of Forestry*, 110(2), 97-104.
21. Bluemarblegeo. (n.d. b). Automatic ground classification. Prieiga per internetą: https://www.blumarblegeo.com/knowledgebase/global-mapper-22/Lidar_Module/ground_classification.htm
22. Bluemarblegeo. (2019). Global Mapper scripting reference v.21.0. Prieiga per internetą: https://www.blumarblegeo.com/knowledgebase/global-mapper-21/GlobalMapper_ScriptingReference.pdf
23. Filin, S. & Pfeifer, N. (2006). Segmentation of airborne laser scanning data using a slope adaptive neighborhood. *ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(2), 71-80.
24. Nguyen, A. & Le, B. (2013, November). 3D point cloud segmentation: A survey. In *2013 6th IEEE conference on robotics, automation and mechatronics (RAM)* (pp. 225-230). IEEE.
25. Wang, A., He, X., Ghamisi, P. & Chen, Y. (2018). LiDAR data classification using morphological profiles and convolutional neural networks. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 15(5), 774-778.
26. Xie, H., & Chen, Y. (2020). LiDAR Data Classification Based on Automatic Designed CNN. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*.
27. He, X., Wang, A., Ghamisi, P., Li, G. & Chen, Y. (2018). LiDAR data classification using spatial transformation and CNN. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16(1), 125-129.
28. Zorzi, S., Maset, E., Fusiello, A. & Crosilla, F. (2019). Full-waveform airborne LiDAR data classification using convolutional neural networks. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 57(10), 8255-8261.
29. Jin, S., Su, Y., Gao, S., Wu, F., Hu, T., Liu, J., ... & Guo, Q. (2018). Deep learning: individual maize segmentation from terrestrial lidar data using faster R-CNN and regional growth algorithms. *Frontiers in plant science*, 9, 866.

30. Pan, S., Guan, H., Chen, Y., Yu, Y., Gonçalves, W. N., Junior, J. M. & Li, J. (2020). Land-cover classification of multispectral LiDAR data using CNN with optimized hyper-parameters. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 166, 241-254.
31. Zhang, K., Chen, S. C., Whitman, D., Shyu, M. L., Yan, J. & Zhang, C. (2003). A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 41(4), 872-882.
32. Pingel, T. J., Clarke, K. C. & McBride, W. A. (2013). An improved simple morphological filter for the terrain classification of airborne LIDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 77, 21-30.
33. Wang, Q., Wu, L., Xu, Z., Tang, H., Wang, R. & Li, F. (2014, July). A progressive morphological filter for point cloud extracted from UAV images. In *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 2023-2026). IEEE.
34. Zhang, K., Yan, J. & Chen, S. C. (2006). Automatic construction of building footprints from airborne LIDAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(9), 2523-2533.
35. Hao, Y., Zhen, Z., Li, F. & Zhao, Y. (2019). A graph-based progressive morphological filtering (GPMF) method for generating canopy height models using ALS data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 79, 84-96.
36. Ismail, Z., Rahman, M. Z. A., Salleh, M. R. M., Busu, I., Amerudin, S. & Kadir, W. H. W. (2015). An improved progressive morphological filtering algorithm based on spatially-distributed slope value over tropical vegetated regions. *Jurnal Teknologi*, 77(26).
37. Hui, Z., Wu, B., Hu, Y. & Ziggah, Y. Y. (2017). Improved progressive morphological filter for digital terrain model generation from airborne lidar data. *Applied optics*, 56(34), 9359-9367.
38. Hui, Z., Hu, Y., Yevenyo, Y. Z. & Yu, X. (2016). An improved morphological algorithm for filtering airborne LiDAR point cloud based on multi-level kriging interpolation. *Remote Sensing*, 8(1), 35.
39. Zhao, X., Guo, Q., Su, Y. & Xue, B. (2016). Improved progressive TIN densification filtering algorithm for airborne LiDAR data in forested areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 117, 79-91.
40. Wang, X., Ma, X., Yang, F., Su, D., Qi, C. & Xia, S. (2020). Improved progressive triangular irregular network densification filtering algorithm for airborne LiDAR data based on a multiscale cylindrical neighborhood. *Applied Optics*, 59(22), 6540-6550.
41. Pérez-García, J. L., Delgado, J., Cardenal, J., Colomo, C. & Ureña, M. A. (2012). Progressive densification and region growing methods for LIDAR data classification. *International*

- Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39(B3), 155-160.
42. Nie, S., Wang, C., Dong, P., Xi, X., Luo, S. & Qin, H. (2017). A revised progressive TIN densification for filtering airborne LiDAR data. *Measurement*, 104, 70-77.
 43. Kang, X., Liu, J. & Lin, X. (2014). Streaming progressive TIN densification filter for airborne LiDAR point clouds using multi-core architectures. *Remote sensing*, 6(8), 7212-7232.
 44. Sithole, G. & Vosselman, G. (2004). Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 59(1-2), 85-101.
 45. Lin, X. & Zhang, J. (2014). Segmentation-based filtering of airborne LiDAR point clouds by progressive densification of terrain segments. *Remote Sensing*, 6(2), 1294-1326.
 46. Shen, J., Liu, J., Lin, X. & Zhao, R. (2012). Object-based classification of airborne light detection and ranging point clouds in human settlements. *Sensor Letters*, 10(1-2), 221-229.
 47. Lohmann, P. (2002). Segmentation and filtering of laser scanner digital surface models. *INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES*, 34(2), 311-316.
 48. Tóvári, D. & Pfeifer, N. (2005). Segmentation based robust interpolation-a new approach to laser data filtering. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(3/19), 79-84.

PRIEDAI

Priedas Nr. 1