

ANALIZA VSEBNOSTI SPEKTRALNEGA SIGNALA NA POSNETKIH SENTINEL-2 ZA KARTIRANJE REK IN OBREČNEGA PROSTORA

mag. Liza Stančič

ZRC SAZU, Inštitut za antropološke in prostorske študije
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
liza.stancic@zrc-sazu.si, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7253-1180>

dr. Krištof Oštir

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
kristof.ostir@fgg.uni-lj.si, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4887-7798>

dr. Žiga Kokalj

ZRC SAZU, Inštitut za antropološke in prostorske študije
Center odličnosti VESOLJE-SI
ziga.kokalj@zrc-sazu.si, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1712-0351>

DOI: https://doi.org/10.3986/9789610504696_05

UDK: 528.8:528.9(282)

IZVLEČEK

Analiza vsebnosti spektralnega signala na posnetkih Sentinel-2 za kartiranje rek in obrečnega prostora
Prispevek prikazuje metodo za kartiranje pokrovnosti rečnega in obrečnega prostora na posnetkih Sentinel-2. Metoda temelji na analizi vsebnosti spektralnega signala (AVSS), ki daje podpikselske tematske informacije. Na podlagi AVSS smo izdelali karte z deleži pokrovnosti za razrede prod, vegetacija in površinska voda. Ključni podatek za AVSS je odbojnost čistih ali končnih slikovnih elementov, ki vsebujejo le en razred pokrovnosti. Primerjali smo rezultate ročnega in samodejnega izbora končnih slikovnih elementov. Rezultate smo ovrednotili z digitalnimi letalskimi ortofoto posnetki. Povprečna absolutna napaka izračuna deležev pokrovnosti je 0,11 pri ročnem in 0,17 pri samodejnem izboru končnih slikovnih elementov.

KLJUČNE BESEDE

daljinsko zaznavanje, optični satelitski posnetki, Sentinel-2, reke, prodišča, analiza vsebnosti spektralnega signala

ABSTRACT

Spectral signal mixture analysis of Sentinel-2 imagery for mapping rivers and riparian areas

The paper presents a method for mapping land cover classes in river and riparian areas on Sentinel-2 imagery. The method is based on spectral signal mixture analysis (SSMA), which gives sub-pixel thematic information. We produced maps of land cover classes fractions for gravel, vegetation and surface water. The key information for SSMA is the reflectance of pure pixels or endmembers containing only one land cover class. We compared the results of manual and automatic endmember extraction. The results were validated with digital aerial orthophotographs. The mean absolute error of the land cover fractions calculation was 0,11 for manual and 0,17 for automatic endmember extraction.

KEY WORDS

remote sensing, optical satellite imagery, Sentinel-2, rivers, gravel bars, spectral signal mixture analysis

1 Uvod

Glavni namen pri kartiranju rečnega in obrečnega prostora v prispevku je pridobivanje informacij o rečnih prodiščih. Prodišča so pomemben habitat za različne vrste ptic (Denac in Božič 2012; Zeng s sodelavci 2015), nevretenčarjev (Langhans in Tockner 2014) in rastlinskih vrst (Geršič 2010). Poleg pomena za biotsko raznovrstnost imajo prodišča pomembno vlogo pri filtraciji vode, infiltraciji površinske vode v podtalnico, blaženju erozije rečnih bregov in privlačnosti reke za rekreacijo (Robert 2003). Na lokacijo ter obseg prodišč vplivajo antropogeni dejavniki, kot na primer izgradnja jezov in protipoplavne regulacije, ter naravni dejavniki, kot je povečana količina padavin in s tem večji odtok (Assani in Petit 2004). Industrijski odzem prodra na več mestih ogroža obstoj prodišč (Jogan, Kotarac in Lešnik 2004). Prodišča so občutljiva na hidrološke spremembe, zato veljajo za zanesljive kazalnike motenj v fluvialnem okolju (Kiss in Andrásí 2017).

V primerjavi s terenskimi popisi nudi analiza na podlagi podatkov daljinskega zaznavanja hitre rezultate, ki so pri uporabi prosto dostopnih posnetkov tudi cenovno smotrní. Spremljanje obsega in lokacije prodišč z uporabo daljinskega zaznavanja se izvaja z ročnim kartiranjem na podlagi letalskih ortofoto posnetkov Cikličnega aerofotografiranja Slovenije (Ploskovni podatkovni sloj ... 2018) ali satelitskih posnetkov (Serlet 2018). Značilnosti, kot so dobra prostorska, radiometrična in spektralna ločljivost, možnost večstopenjskega pregleda (krajevni, regionalni, svetovni), visoka časovna ločljivost in prosta dostopnost, so omogočile, da so se satelitski posnetki že uveljavili kot pomemben vir podatkov o okolju (de Sherbinin s sodelavci 2014).

Za spremljanje površine vodnih ekosistemov na podlagi podatkov daljinskega zaznavanja je na svetovni ravni razvitih že več izdelkov (Huang s sodelavci 2018). V najširši rabi je *Global Surface Water Explorer*, razvit na Skupnem raziskovalnem centru Evropske komisije (Pekel s sodelavci 2016). Drugi podobni izdelki spremljajo obseg površinske vode skozi čas (Donchyts s sodelavci 2016) ali se osredotočajo na določene oblike površinskih voda, na primer jezera (Verpoorter s sodelavci 2014), mokrišča (Prigent s sodelavci 2001) ali reke (Allen in Pavelsky 2018). Glavna pomanjkljivost omenjenih izdelkov je nizka prostorska ločljivost, ki večinoma ni boljša od 30 m. Za svetovni pregled je to zadovoljivo, na regionalni ali občinski ravni pa lahko vodi do nepopolnih podatkov. Ta omejitev pride do izraza zlasti na območjih z veliko prostorsko razdrobljenostjo, ki je značilna za Slovenijo (Hladnik 2005; Foški 2017). Povirni deli rek v gorskih območjih so tipičen tovrsten izziv.

Za omilitev omejitev povezanih s prostorsko ločljivostjo satelitskih posnetkov smo uporabili metodo kartiranja pokrovnosti rečnega in obrečnega prostora, zasnovano na analizi vsebnosti spektralnega signala (AVSS, angleško *spectral signal mixture analysis*; Atkinson 2005; Foody, Muslim in Atkinson 2005). Glede na odziv posameznega slikovnega elementa na elektromagnetno valovanje v različnih valovnih dolžinah z AVSS določimo deleže izbranih razredov pokrovnosti. Tako dosežemo podpikselsko tematsko natančnost kartiranja, torej natančnost, ki je boljša od prostorske ločljivosti vhodnega posnetka (Ling s sodelavci 2016; Mylona s sodelavci 2018). Ključna informacija za AVSS je spektralni odboj čistih oziroma končnih slikovnih elementov (angleško *endmembers*), to je tistih slikovnih elementov, ki vsebujejo le en razred pokrovnosti (Veganzones in Graña 2008; Somers s sodelavci 2011). Ti končni slikovni elementi so skrajne točke v spektralnem prostoru (Keshava 2003).

Namen naloge je raziskava primernosti AVSS za kartiranje pokrovnosti rek in obrečnega prostora. V tej smeri smo si zadali naslednja cilja:

1. preverjanje natančnosti AVSS za kartiranje prodra, vegetacije in površinske vode;
2. ugotavljanje razlik v natančnosti med ročnim in samodejnim izborom končnih slikovnih elementov.

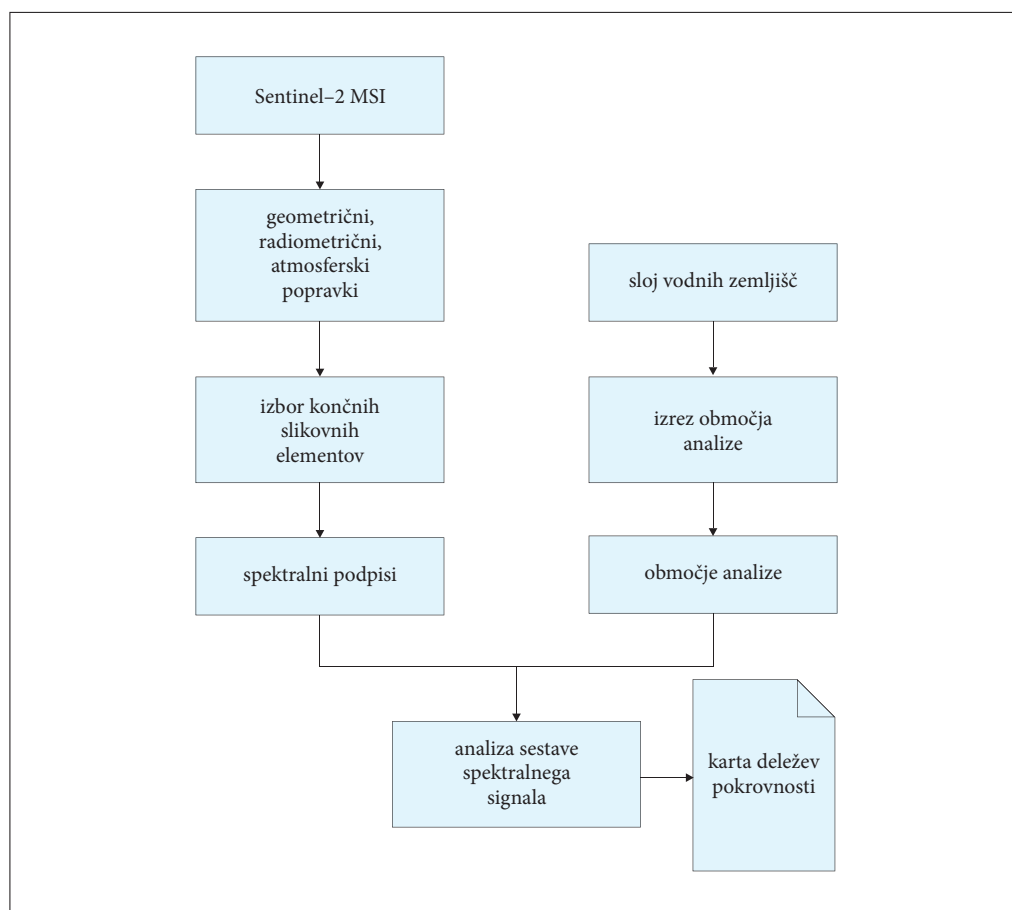
2 Metode dela

Pri razvoju in testiranju metode smo se osredotočili na skoraj 15 km dolg odsek v zgornjem porečju reke Soče med Kobaridom in Tolminom (slika 1). Geološko podlago območja večinoma gradita apnenec

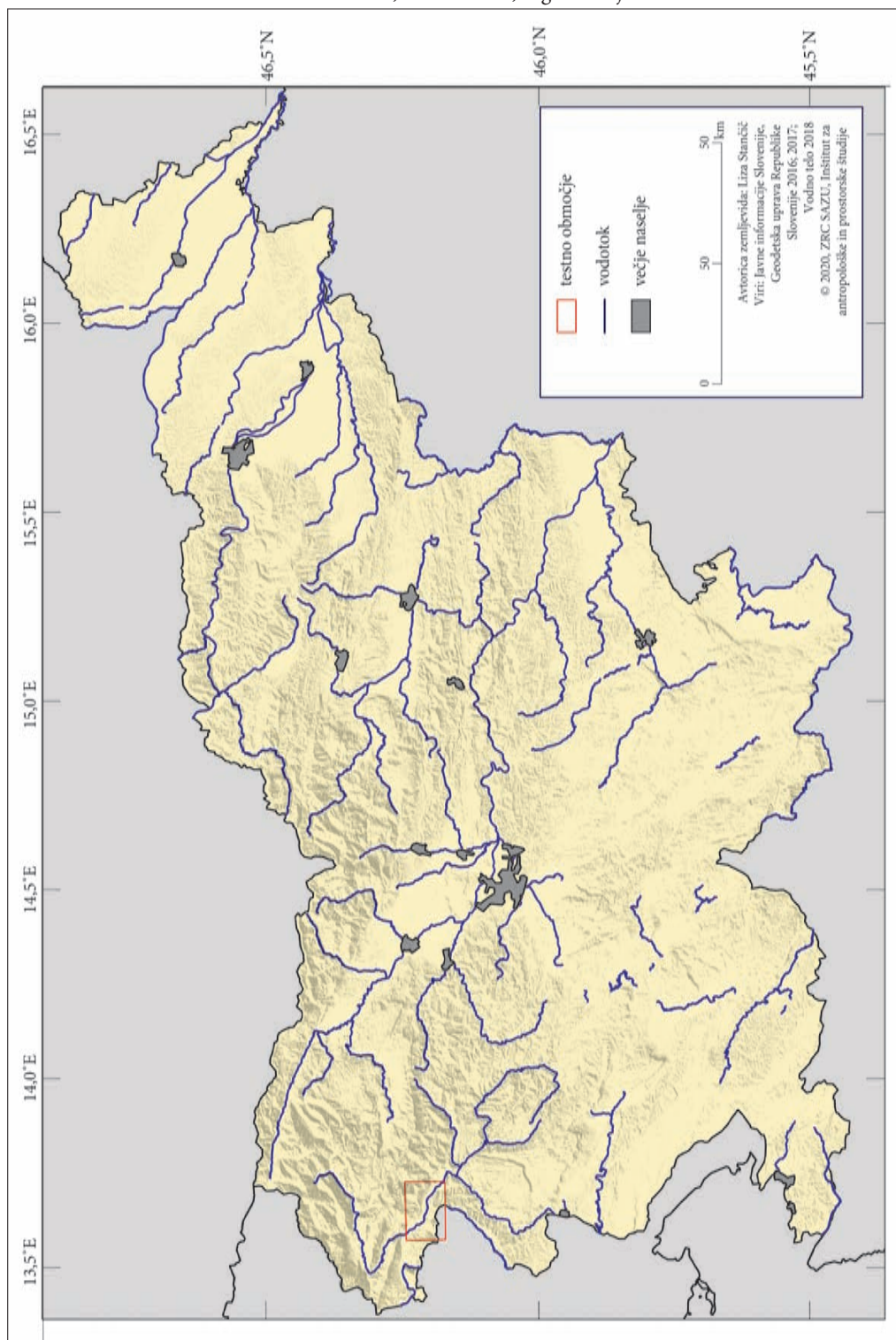
in dolomit, na južnem delu je prisoten fliš (Buser 1987). Podnebje prehaja iz gorskega v zmerno sredozemsko (Ogrin in Plut 2009). Za porečje je značilen snežno-dežni pretočni režim. V aprilu ali maju ob taljenju snega nastopi glavni pretočni višek, sekundarni pa navadno novembra ob jesenskem deževju. Zimski pretočni nižek, ki je posledica snežne retinence, je izrazitejši od poletnega, ki nastopi navadno avgusta zaradi visoke evapotranspiracije (Ogrin in Plut 2009). Zaradi intenzivnih erozijskih procesov gre za najbolj prodonosno območje v Sloveniji (Ranfl 2010). Na izbranem odseku je več prodišč.

Kartiranje pokrovnosti rek in obrečnega prostora smo izvedli v več zaporednih korakih (slika 2). Vhodni podatki so bili optični satelitski posnetki sistema Sentinel-2, ki ga za Evropsko unijo upravlja Evropska vesoljska agencija. Posnetki Sentinel-2, zajeti s senzorjem *Multi-Spectral Instrument* (MSI), imajo 13 spektralnih kanalov in prostorsko ločljivost 10 m, 20 m ali 60 m, odvisno od spektralnega kanala. Prvi satelit, Sentinel-2A, je bil izstreljen junija 2015, drugi, Sentinel-2B, pa marca 2017, s čimer se je časovna ločljivost sistema povečala z deset na pet dni ob ekvatorju (Gatti in Galoppo 2018).

Slika 1: Zemljevid lokacije testnega območja v zgornjem toku reke Soče. ► (str. 76)



Slika 2: Potek analize vsebnosti spektralnega signala za podpikselsko kartiranje pokrovnosti rek in obrečnega prostora (MSI – Multi-Spectral Instrument).



Za analizo smo izbrali satelitske posnetke, za katere je mogoče preveriti natančnost rezultatov z drugimi viri podatkov. Za referenčni sloj smo izbrali ortofote CAS, posnete 26. 6. 2015. V analizo smo vključili satelitske posnetke, posnete čim bližje datuma zajema ortofota in brez oblakov, ki bi zakrivali reko ter obrečni prostor. Za primerjavo smo tako izbrali posnetek Sentinel-2, posnet 11. 7. 2015. Zaradi ohranjanja čim večje prostorske ločljivosti smo v analizo vključili le spektralne kanale z 10- in 20-metrsko prostorsko ločljivostjo. Skupno smo torej analizirali odbojnost v desetih spektralnih kanalih, in sicer 1–8A in 11 ter 12 (preglednica 1).

Posnetke Sentinel-2 je geometrično popravil že ponudnik. Radiometrične in atmosferske popravke smo naredili s procesno verigo STORM (Pehani s sodelavci 2016). Za odstranjevanje vplivov atmosfere in zaznavanje oblakov procesna veriga uporablja program ATCOR 2 (Richter in Schlapfer 2019). Posnetke v spektralnih kanalih Sentinel-2 z ločljivostjo 10 m smo prevzorčili na 20 m z bilinearno interpolacijo. Po predobdelavi je odbojnost, prikazana na posnetkih, posledica zgolj značilnosti površja, s čimer so posnetki primerni za nadaljnje analize.

Območje analize smo določili na podlagi vektorskega sloja vodnih zemljišč Direkcije Republike Slovenije za vode (Vodno zemljišče ... 2018). Gre za površinska vodna telesa do prve geomorfološke spremembe, na primer rečne terase (Metodologija ... 2017).

Naslednji korak v analizi je izbor končnih slikovnih elementov in pridobivanje njihovih spektralnih podpisov. Izbrani razredi pokrovnosti, ki smo jih obravnavali v raziskavi, so prod, vegetacija in voda. Čiste slikovne elemente smo ročno izbrali na satelitskih posnetkih v programu QGIS (QGIS ... 2019). Za vsak razred pokrovnosti smo izbrali 15–20 vzorcev. Pri izboru vzorcev smo s pomočjo pregleda na ortofoto zagotovili, da znotraj izbranega slikovnega elementa ni drugega razreda pokrovnosti. Iz odbojnih vrednosti posameznih vzorcev smo izračunali aritmetično sredino in tako dobili tipične spektralne podpise izbranih razredov pokrovnosti. Za samodejni izbor končnih slikovnih elementov smo uporabili implementacijo algoritma N-FINDR (Winter 1999) v Python knjižnici pysptools (Therien 2018, različica 0.15.0). Algoritem išče izbor slikovnih elementov, ki v večdimenzijskem spektralnem prostoru tvorijo skrajne točke geometrijskega telesa z največjim možnim volumnom (slika 3). Na začetku obravnava naključen izbor slikovnih elementov, za katerega izračuna volumen geometrijskega telesa. Nato en slikovni element zamenja z drugim in ponovi izračun volumna. Če je volumen večji, prvi potencialni končni slikovni element zamenja z drugim. Postopek se ponavlja, dokler algoritem ne naredi nobenih

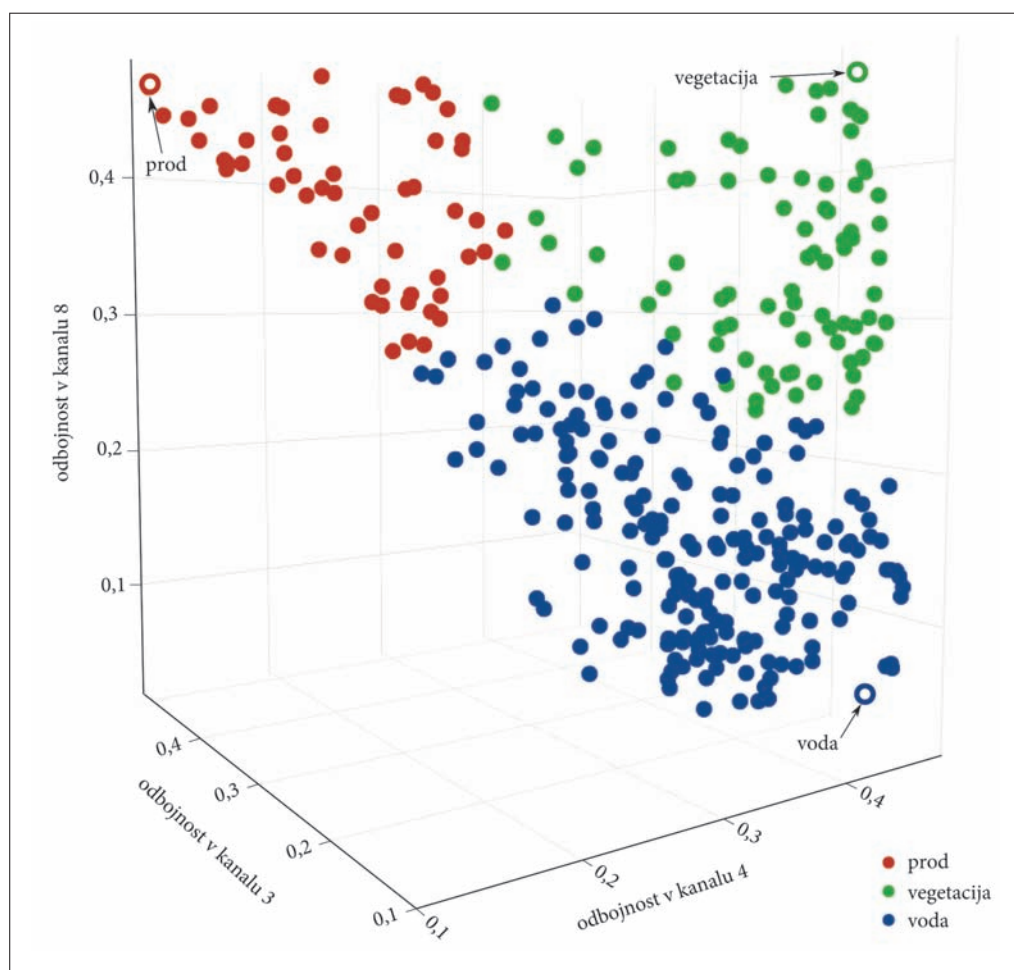
Preglednica 1: Značilnosti spektralnih kanalov senzorja Multi-Spectral Instrument na satelitih Sentinel-2 (Gatti in Galoppo 2018).

spektralni kanal	srednja valovna dolžina (nm)	prostorska ločljivost (m)
1 – robni modri	443	60
2 – modri	490	10
3 – zeleni	560	10
4 – rdeči	665	10
5 – rastlinski robni rdeči	705	20
6 – rastlinski robni rdeči	740	20
7 – rastlinski robni rdeči	783	20
8 – bližnji infrardeči	842	10
8A – rastlinski robni rdeči	865	20
9 – vodna para	945	60
10 – kratkovalovni infrardeči (cirus)	1375	60
11 – kratkovalovni infrardeči	1610	20
12 – kratkovalovni infrardeči	2190	20

zamenjav potencialnih slikovnih elementov več (Winter 1999). Z opisanimi postopkoma smo torej pridobili dva niza spektralnih podpisov – iz ročno in iz samodejno izbranih končnih slikovnih elementov (slika 4).

Metoda AVSS je bila razvita za opazovanje skalnega površja in mineralne sestave na Marsu (Adams, Smith in Johnson 1986). Od takrat so metodo uporabili za različne namene, med drugim za kartiranje rabe tal (Ling s sodelavci 2016), ugotavljanje deležev razredov pokrovnosti na urbanih območjih (Kärđi 2007), spremljanje degradacije tal (Dubovyk s sodelavci 2015), spremljanje stanja travišč (Shao s sodelavci 2018), kartiranje rečnih meja (Niroumand-Jadidi in Vittti 2017) in kartiranje morske obale (Foody, Muslim in Atkinson 2005; Muslim, Foody in Atkinson 2007). Metodo AVSS so uporabili za analizo hiperspektralnih (Keshava 2003; Somers s sodelavci 2011) in večspektralnih posnetkov, vključno s posnetki Landsat (Wu 2004) in Sentinel-2 (Mylona s sodelavci 2018).

AVSS deluje z modeliranjem odbojnosti mešanih slikovnih elementov. Na ta način je odbojnost na satelitskih posnetkih pretvorjena v delež pokrovnosti izbranih končnih slikovnih elementov. Metode modeliranja se v grobem delijo na linearne in nelinearne. Izbor modela je odvisen od predpostavljene



Slika 3: Primer končnih slikovnih elementov v trodimenzijskem spektralnem prostoru.

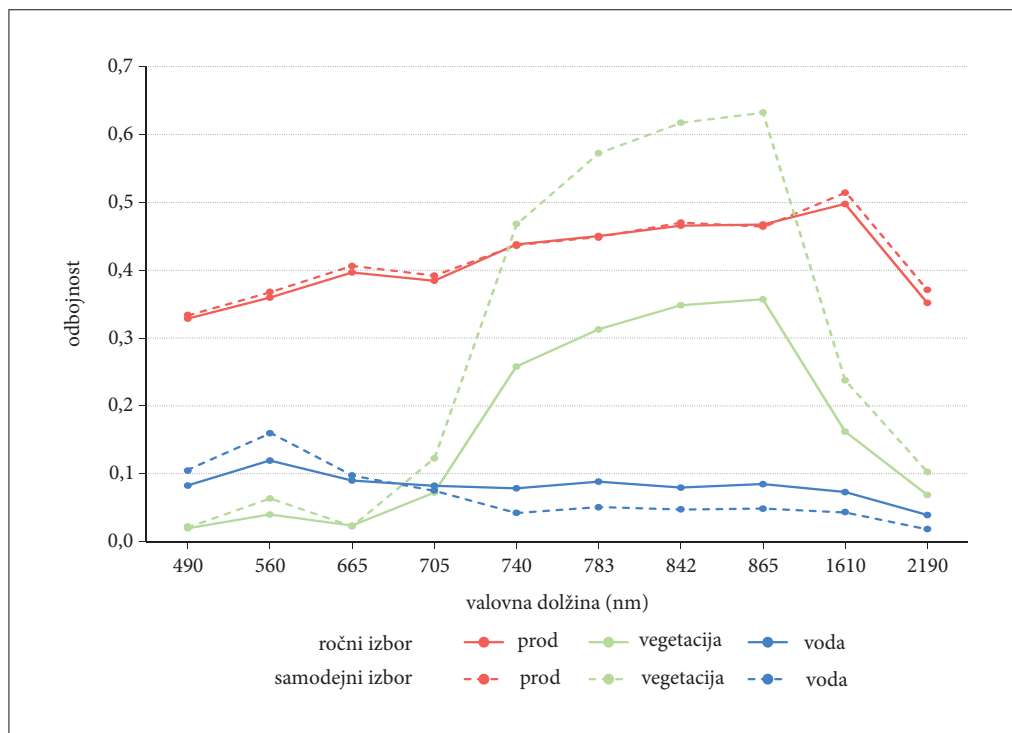
nega mehanizma mešanja spektralnega signala. Linearno mešanje odbojnosti nastopi, ko se obravnavani razredi pokrovnosti pojavljajo v prostorsko zamejenih oblikah. Glavna fizikalna predpostavka pri linearni AVSS je, da vsak vhodni foton reagira zgolj z enim tipom pokrovnosti. Na drugi strani je nelinearno mešanje značilno za primere, kjer so različni tipi pokrovnosti med sabo tesno prepleteni. Mešanje odbojnosti je bolj kompleksno, saj vsak vhodni foton reagira z več različnimi tipi pokrovnosti (Keshava in Mustard 2002; Keshava 2003).

Glede na predpostavke je torej mogoče signal mešanega slikovnega elementa (r) opisati kot linearno kombinacijo čistih signalov končnih slikovnih elementov, obteženih s podpikselskim deležem pokrovnosti. Model je mogoče določiti z enačbo (Adams, Smith in Johnson 1986; Somers s sodelavci 2011):

$$r = Mf + \epsilon$$

kjer je M matrika, v kateri vsak stolpec pomeni spektralni podpis izbranega končnega slikovnega elementa, f je vektor deležev pokrovnosti, ϵ pa je šum oziroma delež signala, ki ga ni mogoče modelirati z uporabo izbranih končnih slikovnih elementov.

Enačba je rešljiva z znanimi spektralnimi podpisi in številom končnih slikovnih elementov, ki je nižje od števila spektralnih kanalov analiziranega posnetka. V praksi za reševanje pogosto uporabijo kvadratno programiranje, metodo največje verjetnosti ali metodo najmanjših kvadratov (Du 2018). Metodo AVSS lahko implementiramo brez omejitev, a je za pridobitev fizikalno smiselnih rezultatov pogosta omejitev vrednosti koeficientov na pozitivna števila. Občasno uporabljajo tudi pogoj, da mora biti seštevek vrednosti koeficientov enak ena (Somers s sodelavci 2011). Obe omejitvi smo upoštevali tudi sami.



Slika 4: Spektralni podpisi izbranih razredov pokrovnosti na uporabljenem posnetku.

Na podlagi spektralnih podpisov izbranih razredov pokrovnosti smo na izbranem območju izvedli linearno AVSS v Python knjižnici `pysptools` (Therien 2018, različica 0.15.0). Uporabili smo implementacijo polno omejenega reševalca metode najmanjših kvadratov (angleško *fully constrained least squares solver*). Z AVSS smo za vsak slikovni element izračunali deleže prisotnosti proda, vegetacije in vode ter naredili karto, ki prikazuje deleže prisotnosti različnih razredov pokrovnosti.

Za ugotavljanje natančnosti AVSS smo na testnem območju izbrali 100 naključnih ploskev v velikosti 20 m × 20 m, ki so se lokacijsko ujemale s slikovnimi elementi posnetka Sentinel-2. Znotraj vsake ploskve smo zarisali enakomerno mrežo 100 točk, ki so bile vsaj en meter oddaljene od roba ploskve. Na lokaciji vsake točke smo določili razred pokrovnosti, pri čemer smo uporabili barvni ortofoto s prostorsko ločljivostjo 25 cm × 25 cm. Za boljše ločevanje vegetacije od vode smo si pomagali tudi z lažno barvno podobo ortofota v bližnji infrardeči valovni dolžini in prostorsko ločljivostjo 50 cm × 50 cm. Zaradi omejenega števila obravnavanih razredov pokrovnosti smo naredili nekatere poenostavitve. Pozidane površine (na primer ceste) in gole površine (na primer prst) smo vključili v razred prod. Drevesa, grmovje in travo smo označili kot vegetacijo. Območjem v senci smo pripisali enega izmed razredov pokrovnosti, v kolikor smo ga lahko razbrali iz konteksta. S seštevkom števila točk z vsakim izmed obravnavanih razredov pokrovnosti smo dobili referenčne deleže pokrovnosti na vsaki ploskvi. Te vrednosti smo primerjali z deleži, izračunanimi z AVSS. Izračunali smo povprečno absolutno napako (PAN):

$$PAN = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - x|$$

ki je izražena kot povprečna absolutna razlika med deleži pokrovnosti na ortofotu (x) in deleži pokrovnosti, izračunanimi z metodo AVSS (x_i). Vrednost PAN je izračunana za vseh 100 ploskev ($n = 100$).

3 Rezultati

Primerjava z ortofotom in pregled na satelitskih posnetkih sta pokazala, da smo s samodejno metodo izbrali enake razrede končnih slikovnih elementov kot z ročnim pristopom, in sicer prod, vegetacijo in vodo. Izdelali smo karte deleža pokrovnosti proda, vegetacije in vode na podlagi ročno (slika 5) in samodejno izbranih (slika 6) končnih slikovnih elementov. Vizualno so karte videti smiselne. Območja z večjim deležem vode so linijska in sklenjena. Večji delež vegetacije je zaznan v sklenjenih območjih na rečnih bregovih. Območja z večjimi deleži proda se pojavljajo ob rečnih bregovih ter v sredini struge v oblikah, ki so podobne prodiščem.

Rezultati AVSS na podlagi ročno izbranih končnih slikovnih elementov so bolj natančni kot rezultati na podlagi samodejno izbranih končnih slikovnih elementov (preglednica 2). Povprečna absolutna napaka izračuna deležev pokrovnosti je pri obeh metodah pod 0,2; pri metodi ročnega izbora pa je za 0,06 nižja kot pri metodi samodejnega izbora končnih slikovnih elementov. Razlika med metodama

Preglednica 2: Povprečna absolutna napaka izračuna deležev pokrovnosti po razredih pokrovnosti za različni metodi izbora končnih slikovnih elementov.

razred pokrovnosti	ročni izbor	samodejni izbor
prod	0,11	0,11
vegetacija	0,10	0,16
voda	0,12	0,22
skupaj	0,11	0,17

je najmanjša pri določevanju deležev proda, kjer se metodi v povprečni absolutni napaki razlikujeta manj kot 0,005. Največja razlika med metodama je pri določevanju deležev površinske vode, in sicer več kot 0,1 v povprečni absolutni napaki.

4 Razprava

Izdelana karta pokrovnosti rečnega in obrečnega prostora na podlagi AVSS je videti smiselno. Vodne površine so sklenjene. Za vsak posamezen slikovni element dobimo informacije o deležu prisotnosti izbranih razredov pokrovnosti. Rezultati nakazujejo, da lahko z AVSS v primerjavi s tako imenovano trdo klasifikacijo, kjer vsak slikovni element pripišemo enemu od izbranih razredov pokrovnosti, dobimo tematsko bolj natančne informacije o pokrovnosti rečnih in obrečnih ekosistemov.

Kljub tematsko bolj podrobnim informacijam, je še vedno prisotna prostorska omejitev natančnosti rezultatov glede na prostorsko ločljivost vhodnega satelitskega posnetka. Posamezen slikovni element je namreč osnovna enota, za katero so podani deleži pokrovnost različnih razredov.

Natančnost uporabljene metode AVSS je primerljiva z drugimi izračuni deležev pokrovnosti z uporabo AVSS (Schug s sodelavci 2018). Tako ročna kot samodejna metoda uspešno zaznata delež proda. Najtežavnejše je zaznavanje vode. Zaradi nizke globine reke pogosto pride do odboja svetlobe od rečnega dna in posledične napačne klasifikacije vode v klasifikacijski razred prod. Težave so tudi na območjih, kjer raste vegetacija zelo različnih višin, saj so sence pogosto napačno klasificirane kot voda. Za izboljšanje natančnosti izračuna deležev pokrovnosti bi lahko v analizo vključili četrti končni slikovni element, ki bi upošteval značilnosti senc (Amaral s sodelavci 2015). Glede na velika odstopanja v primeru modeliranja prisotnosti vode, bi lahko uporabili več različnih končnih slikovnih elementov za opis spektralnega signala vode. Voda je lahko spektralno zelo raznolika, zato se za njeno modeliranje uporablja tudi 10 (Irion 2018) ali do 30 različnih modelov (Cavanaugh s sodelavci 2011).

Glavna omejitev metode, povezana z uporabo optičnih satelitskih posnetkov, je prisotnost oblakov, ki zakrivajo površje. Poleg oblakov in njihovih senc opazovanje površja onemogočajo tudi sence visokih gora ali hribov, ki v ozkih rečnih dolinah zmanjšujejo natančnost klasifikacije. To je posebej problematično v zimskih mesecih, ko je Sonce nizko nad obzorjem in je vpadni kot žarkov majhen.

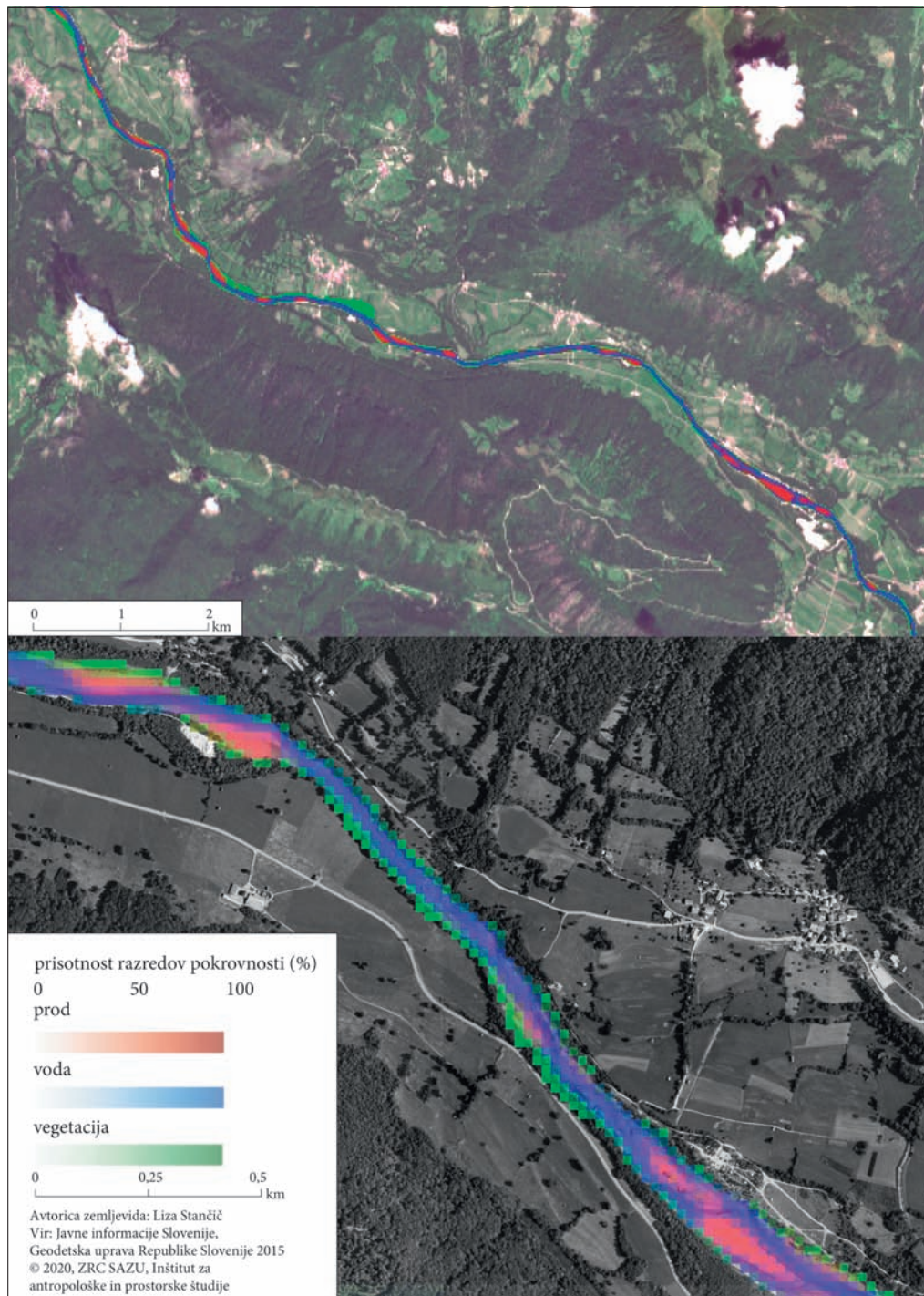
Poleg splošnih omejitev, povezanih z značilnostmi optičnega daljinskega zaznavanja, so pomembne tudi omejitve povezane s samo metodo AVSS. Metoda je zelo odvisna od kakovosti izbranih končnih slikovnih elementov. V primeru, da ti ne odražajo resničnega spektralnega signala izbranega razreda pokrovnosti, so rezultati napačni. Kljub večji natančnosti modela na podlagi ročno izbranih končnih slikovnih elementov je pomembna ugotovitev, da s samodejno izbranimi končnimi slikovnimi elementi ne dobimo bistveno slabših rezultatov. Samodejni izbor poleg velikega časovnega prihranka omogoča večjo prenosljivost metode na druga območja opazovanja.

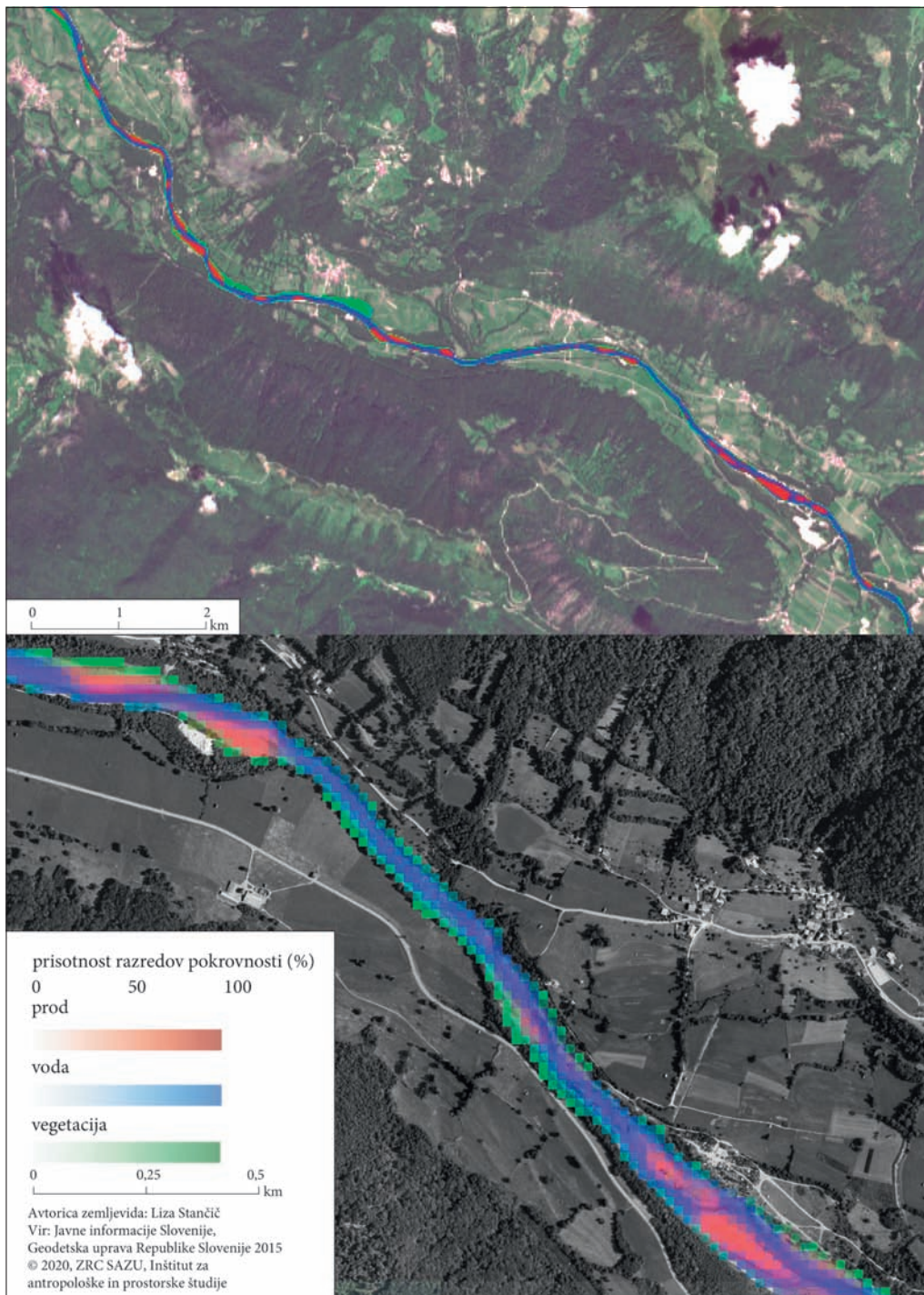
5 Sklep

Rečni ekosistemi so značilno dinamični, zato jih je smiselno spremljati z daljinskim zaznavanjem, ki omogoča gosto časovno vrsto podatkov. V prispevku je opisana metoda kartiranja pokrovnosti rečnih ekosistemov z analizo vsebnosti spektralnega signala (AVSS) na odseku Soče med Kobaridom in Tolminom. Metodo AVSS, ki sodi med tako imenovane mehke klasifikatorje, smo izbrali zaradi

Slika 5: Karta deležev izbranih razredov pokrovnosti na testnem območju na podlagi ročno izbranih končnih slikovnih elementov. ► (str. 82)

Slika 6: Karta deležev izbranih razredov pokrovnosti na testnem območju na podlagi samodejno izbranih končnih slikovnih elementov. ► (str. 83)





možnosti podajanja tematsko bolj natančnih rezultatov od trde klasifikacije. Za obravnavano območje je značilne majhne površine z notnim razredom pokrovnosti, zato so podpikselske informacije pomemben podatek. Na podlagi satelitskih posnetkov Sentinel-2 smo izdelali karte deležev prisotnosti treh izbranih razredov pokrovnosti – prod, vegetacija in površinska voda. Primerjali smo rezultate AVSS na podlagi ročno in samodejno izbranih končnih slikovnih elementov, to je slikovnih elementov z enim samim razredom pokrovnosti. Natančnost izračuna deležev smo preverjali z referenčnimi podatki ortofoto CAS, ki so bili posneti v enakem časovnem obdobju kot satelitski posnetki.

Rezultati so pokazali, da AVSS večinoma uspešno modelira odbojnost izbranih razredov pokrovnosti. Metoda je najbolj natančna za kartiranje deleža proda. Kartiranje deleža površinske vode je najbolj težavno, zlasti s samodejno izbranimi končnimi slikovnimi elementi. Na testnem območju je voda večinoma plitva, zato prihaja do presevanja rečnega dna in posledične napačne klasifikacije vode med prod. Poleg tega je veliko območij, ki se nahajajo v senci, klasificiranih kot voda. Možna izboljšava je vključitev dodatnega končnega slikovnega elementa, ki bi vseboval sence ali uporaba več različnih končnih slikovnih elementov za modeliranje vode.

ZAHVALA: Hvala prof. dr. Reinhertu Ceulemansu in prof. dr. Marku Krevsu za koristne nasvete pri pripravi osnutka prispevka. Raziskavo je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije v okviru raziskovalnega programa številka P2-0406 Opazovanje Zemlje in geoinformatika, temeljnega raziskovalnega projekta številka J6-9395 in usposabljanja mlade raziskovalke številka SP-0618/17.

6 Viri in literatura

- Adams, J. B., Smith, M. O., Johnson, P. E. 1986: Spectral mixture modeling: A new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 site. *Journal of Geophysical Research* 91-B8. DOI: <https://doi.org/10.1029/JB091iB08p08098>
- Allen, G. H., Pavelsky, T. M. 2018: Global extent of rivers and streams. *Science* 361-6402. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aat0636>
- Amaral, C. H., Roberts, D. A., Almeida, T. I. R., Souza Filho, C. R. 2015: Mapping invasive species and spectral mixture relationships with neotropical woody formations in southeastern Brazil. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.06.009>
- Assani, A. A., Petit, F. 2004: Impact of hydroelectric power releases on the morphology and sedimentology of the bed of the Warche River (Belgium). *Earth Surface Processes and Landforms* 29-2. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.1004>
- Atkinson, P. M. 2005: Sub-pixel target mapping from soft-classified, remotely sensed imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 71-7. DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.71.7.839>
- Buser, S., 1987: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, list Tolmin in Videm (Udine). *Zvezni geološki zavod, Beograd. Medmrežje:* <http://biotit.geo-zs.si/ogk100/> (15. 1. 2019).
- Cavanaugh, K. C., Siegel, D. A., Reed, D. C., Dennison, P. E. 2011: Environmental controls of giant-kelp biomass in the Santa Barbara Channel, California. *Marine Ecology Progress Series* 429. DOI: <https://doi.org/10.3354/meps09141>
- de Sherbinin, A., Levy, M. A., Zell, E., Weber, S., Jaiteh, M. 2014: Using satellite data to develop environmental indicators. *Environmental Research Letters* 9-8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/8/084013>
- Denac, D., Božič, L. 2012: Gnezdilke rečne struge, Monitoring učinkov vodnogospodarskih vzdrževalnih del na stanje izbranih varovanih vrst in habitatnih tipov na območju Natura 2000 Drava med Malečnikom in Duplekom. Končno poročilo, Društvo za opazovanje in proučevanje ptic Slovenije. Ljubljana. *Medmrežje:* http://www.natura2000.gov.si/uploads/tx_library/monitoring_gnezdiik_final_2012_1.pdf (4. 1. 2019).

- Donchyts, G., Baart, F., Winsemius, H., Gorelick, N., Kwadijk, J., van de Giesen, N. 2016: Earth's surface water change over the past 30 years. *Nature Climate Change* 6-9. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate3111>
- Du, Q. 2018: Pixel unmixing. *Comprehensive Remote Sensing*. Oxford.
- Dubovyk, O., Menz, G., Lee, A., Schellberg, J., Thonfeld, F., Khamzina, A. 2015: SPOT-based sub-field level monitoring of vegetation cover dynamics, A case of irrigated croplands. *Remote Sensing* 7-6. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs70606763>
- Foody, G. M., Muslim, A. M., Atkinson, P. M. 2005: Super-resolution mapping of the waterline from remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing* 26-24. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160500213292>
- Foški, M. 2017: Določanje parcelnih vzorcev in analiza njihovega spreminjanja v slovenskem podeželskem prostoru. Doktorska disertacija, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Gatti, A., Galoppo, A. 2018: Sentinel-2 products specification document. Medmrežje: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2-Products-Specification-Document> (14. 1. 2019).
- Geršič, M. 2010: Sukcesija na prodiščih reke Save. *Dela* 33. DOI: <https://doi.org/10.4312/dela.33.1.5-19>
- Hladnik, D. 2005: Spatial structure of disturbed landscapes in Slovenia. *Ecological Engineering* 24, 1-2. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.12.004>
- Huang, C., Chen, Y., Zhang, S., Wu, J. 2018: Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: A review. *Reviews of Geophysics* 56-2. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018RG000598>
- Irion, D. 2018: Estimating kelp cover from Landsat imagery. Medmrežje: <https://www.caperadd.com/news/estimating-kelp-cover-from-landsat-imagery/> (15. 9. 2019).
- Javne informacije Slovenije 2015. Digitalni ortofoto. Geodetska uprava Republike Slovenije. Ljubljana, 2015.
- Javne informacije Slovenije 2016. Digitalni model višin. Geodetska uprava Republike Slovenije. Ljubljana, 2016.
- Javne informacije Slovenije 2017. Državna pregledna karta merila 1 : 1.000.000 – vektorski podatki. Geodetska uprava Republike Slovenije. Ljubljana, 2017.
- Jogan, N., Kotarac, M., Lešnik, A. (ur.) 2004: Opredelitev območij evropsko pomembnih negozdnih habitatnih tipov s pomočjo razširjenosti značilnih rastlinskih vrst. Končno poročilo, Center za kartografijo favne in flore. Miklavž na Dravskem polju.
- Kärdi, T. 2007: Remote sensing of urban areas, Linear spectral unmixing of Landsat Thematic Mapper images acquired over Tartu (Estonia). *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Biology, Ecology* 56-1.
- Keshava, N. 2003: A survey of spectral unmixing algorithms. *Lincoln Laboratory Journal* 14-1.
- Keshava, N., Mustard, J. F. 2002: Spectral unmixing. *IEEE Signal Processing* 19-1.
- Kiss, T., András, G. 2017: Hydro-morphological responses of the Drava river on various engineering works. *Ekonomika i Ekohistorija* 13.
- Langhans, S. D., Tockner, K. 2014: Edge effects are important in supporting beetle biodiversity in a gravel-bed river floodplain. *PLOS ONE* 9-12. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114415>
- Ling, F., Zhang, Y., Foody, G. M., Li, X., Zhang, X., Fang, S., Li, W., Du, Y. 2016: Learning-based super-resolution land cover mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 54-7. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2527841>
- Metodologija za zajem podatkov hidrografije in dejanske rabe – Verzija 2.0. Geodetski inštitut Slovenije. Ljubljana, 2017. Medmrežje: http://www.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/podrocja/voda/metodologija_zajem_podatkov_vodna_zemljisca_feb2018.pdf (28. 1. 2019).
- Muslim, A. M., Foody, G. M., Atkinson, P. M. 2007: Shoreline mapping from coarse-spatial resolution remote sensing imagery of Seberang Takir, Malaysia. *Journal of Coastal Research* 236. DOI: <https://doi.org/10.2112/04-0421.1>
- Mylona, E., Daskalopoulou, V., Sykioti, O., Koutroumbas, K., Rontogiannis, A. 2018: Classification of Sentinel-2 images utilizing abundance representation. *Proceedings 2*. DOI: <https://doi.org/10.3390/ecrs-2-05141>

- Niroumand-Jadidi, M., Vitti, A. 2017: Reconstruction of river boundaries at sub-pixel resolution, Estimation and spatial allocation of water fractions. ISPRS International Journal of Geo-Information 6-12. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi6120383>
- Ogrin, D., Plut, D. 2009: Aplikativna fizična geografija Slovenije. Ljubljana.
- Pehani, P., Čotar, K., Marsetič, A., Zaletelj, J., Oštir, K. 2016: Automatic geometric processing for very high resolution optical satellite data based on vector roads and orthophotos. Remote Sensing 8-4. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8040343>
- Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., Belward, A. S. 2016: High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. Nature 540-7633. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Ploskovni podatkovni sloj hidrografije – objekti in ostalo. Direkcija Republike Slovenije za vode. Ljubljana, 2018. Medmrežje: http://www.statika.evode.gov.si/fileadmin/vodkat/DRSV_HIDRO5_OBM_OBJ.zip (15. 1. 2019).
- Prigent, C., Matthews, E., Aires, F., Rossow, W. B. 2001: Remote sensing of global wetland dynamics with multiple satellite data sets. Geophysical Research Letters 28-24. DOI: <https://doi.org/10.1029/2001GL013263>
- QGIS Development Team 2019. QGIS Geographic Information System.
- Ranfl, I. 2010: Razvejana struga Soče v Bovški kotlini. Diplomsko delo, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Richter, R., Schlapfer, D. 2019: Atmospheric/topographic correction for satellite imagery (ATCOR-2/3). User guide, Version 9.3.0. Medmrežje: https://www.rese-apps.com/pdf/atcor3_manual.pdf (8. 2. 2019).
- Robert, A. 2003: River Processes: An Introduction to Fluvial Dynamics. London, New York.
- Schug, F., Okujeni, A., Hauer, J., Hostert, P., Nielsen, J. Ø., van der Linden, S. 2018: Mapping patterns of urban development in Ouagadougou, Burkina Faso, using machine learning regression modeling with bi-seasonal Landsat time series. Remote Sensing of Environment 210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.022>
- Serlet, A. J. 2018: Biomorphodynamics of river bars in channelized, hydropower-regulated rivers. Doktorska disertacija, University of Trento in Queen Mary University of London. Trento, London.
- Shao, Q., Shi, Y., Xiang, Z., Shao, H., Xian, W., Peng, P., Li, C., Li, Q. 2018: Monitoring the grassland change in the Qinghai-Tibetan plateau: A case study on Aba County. Journal of the Indian Society of Remote Sensing 46-4. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12524-017-0721-7>
- Somers, B., Asner, G. P., Tits, L., Coppin, P. 2011: Endmember variability in spectral mixture analysis: A review. Remote Sensing of Environment 115-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.03.003>
- Therien, C. 2018: PySptools documentation. Medmrežje: <https://pysptools.sourceforge.io/index.html> (21. 2. 2020).
- Veganzones, M. A., Graña, M. 2008: Endmember extraction methods: A short review. Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, Proceedings of the 12th International Conference KES. Zagreb.
- Verpoorter, C., Kutser, T., Seekell, D. A., Tranvik, L. J. 2014: A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery. Geophysical Research Letters 41-18. DOI: <https://doi.org/10.1002/2014GL060641>
- Vodno telo. Direkcija Republike Slovenije za vode. Ljubljana, 2018. Medmrežje: http://www.statika.evode.gov.si/fileadmin/vodkat/DRSV_VTVOD_VT.zip (15. 1. 2019).
- Vodno zemljišče tekočih celinskih voda. Direkcija Republike Slovenije za vode. Ljubljana, 2018. Medmrežje: http://www.statika.evode.gov.si/fileadmin/vodkat/DRSV_VZ_TEK_CV.zip (15. 1. 2019).
- Winter, M. E. 1999: N-FINDR, An algorithm for fast autonomous spectral end-member determination in hyperspectral data. Proceedings of the SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation. Denver. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.366289>
- Wu, C. 2004: Normalized spectral mixture analysis for monitoring urban composition using ETM+ imagery. Remote Sensing of Environment 93-4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.08.003>
- Zeng, Q., Shi, L., Wen, L., Chen, J., Duo, H., Lei, G. 2015: Gravel bars can be critical for biodiversity conservation: A case study on Scaly-sided Merganser in South China. PLOS ONE 10-5. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127387>