

METODE

UGOTAVLJANJE POKROVNOSTI SLOVENIJE IZ SATELITSKIH POSNETKOV LANDSAT

AVTORJA

Žiga Kokalj*Inštitut za antropološke in prostorske študije, ZRC SAZU, Novi trg 2, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija
ziga.kokalj@zrc-sazu.si***dr. Krištof Oštir***Inštitut za antropološke in prostorske študije, ZRC SAZU, Novi trg 2, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija
kristof@zrc-sazu.si*

UDK: 528.6:711.14(497.4)

COBISS: 1.01

IZVLEČEK

Ugotavljanje pokrovnosti Slovenije iz satelitskih posnetkov Landsat

Daljinsko zaznavanje oziroma napredna klasifikacija satelitskih posnetkov sta natančna in cenovno ugodna alternativa klasičnim tehnikam kartiranja pokrovnosti. V prispevku so predstavljene metode za pridobitev zanesljive karte pokrovnosti zemeljskega površja. Kompleksnost slovenske pokrajine, zlasti izrazita drobnoposestniška struktura in z njo povezana velika spremenljivost rabe tal na kratke razdalje, narekuje kombinacijo različnih virov podatkov, kot so satelitski posnetki Landsat, digitalni model višin, posnetki ortofoto in obstoječe topografske in tematske karte. Kot glavni klasifikacijski algoritem je bila uporabljena metoda največje verjetnosti, natančnost je bila povečana z upoštevanjem klasifikacije v dva sloja, omejevanjem z višino in naklonom ter dodatnih slojev.

KLJUČNE BESEDE

satelitski posnetki, pokrovnost, raba tal, klasifikacija, Landsat, Slovenija

ABSTRACT

Land cover map of Slovenia from Landsat satellite imagery

Remote sensing, or to be more specific advanced satellite images classification, represents an accurate and cost-effective alternative to the classical techniques of land cover mapping. The methods used to produce a reliable land cover map are presented in the paper. The complexity of the Slovenian landscape, especially complex cultivation patterns and high frequency of land use changes over short distances, requires a combination of data sources such as Landsat satellite images, a digital elevation model, digital orthophotos as well as existing topographic and thematic maps. Maximum likelihood algorithm was used as the main classifier and the accuracy of results was further improved by fuzzy classification, altitude and inclination filtering and auxiliary data.

KEY WORDS

satellite images, land cover, land use, classification, Landsat, Slovenia

Uredništvo je prispevek prejelo 20. aprila 2006.

1 Uvod

Daljinsko zaznavanje oziroma napredna klasifikacija satelitskih posnetkov predstavljata natančno in cenovno ugodno alternativo klasičnim tehnikam kartiranja pokrovnosti. Terenski pregled je primeren za manjša območja in občasne študije, ne moremo pa z njim v razumnem času in/ali z realnimi stroški pokriti večjih površin. Klasifikacija satelitskih in letalskih posnetkov se je v preteklosti izkazala za primerno izbiro, saj omogoča tako podrobno klasifikacijo kot hitro izvedbo in časovne primerjave. Tehnologija klasifikacije podob daljinskega zaznavanja je poznana in uveljavljena, vendar pa jo je treba prilagoditi posameznemu okolju in opazovanim pojavom. Pri klasifikaciji pokrovnosti Slovenije smo posebno pozornost namenili vsem korakom, od izbire podatkov do analize kakovosti. Ukvarjali smo se z naprednimi tehnikami obdelave, kot je poklasifikacijsko modeliranje, saj z osnovnimi ni moč pridobiti sloja dovolj visoke natančnosti. Izdelan zemljevid pokrovnosti podaja prostorsko razporeditev izbranih kategorij na ravni celice z osnovnico 25 m in je primeren zlasti za študije na regionalni ali državni ravni.

2 Pregled dosedanjega dela

Za celotno območje Slovenije so na razpolago številni digitalni sloji rabe tal oziroma pokrovnosti. Rabo tal lahko definiramo kot namen, za katerega ljudje izkoriščajo nek kos zemljišča s poudarkom na funkcijski vlogi zemljišča v ekonomskih aktivnostih. Je abstraktna in je včasih ne moremo določiti niti s podrobnim ogledom. Pokrovnost, na drugi strani, pa je konkretna in jo lahko kot tako neposredno opazujemo (Campbell 1996, 550). Za uspešno načrtovanje in gospodarjenje z zemljišči moramo biti seznanjeni z obema. Razlika postane pomembnejša, ko merilo raziskave postane večje in detajli podrobnejši.

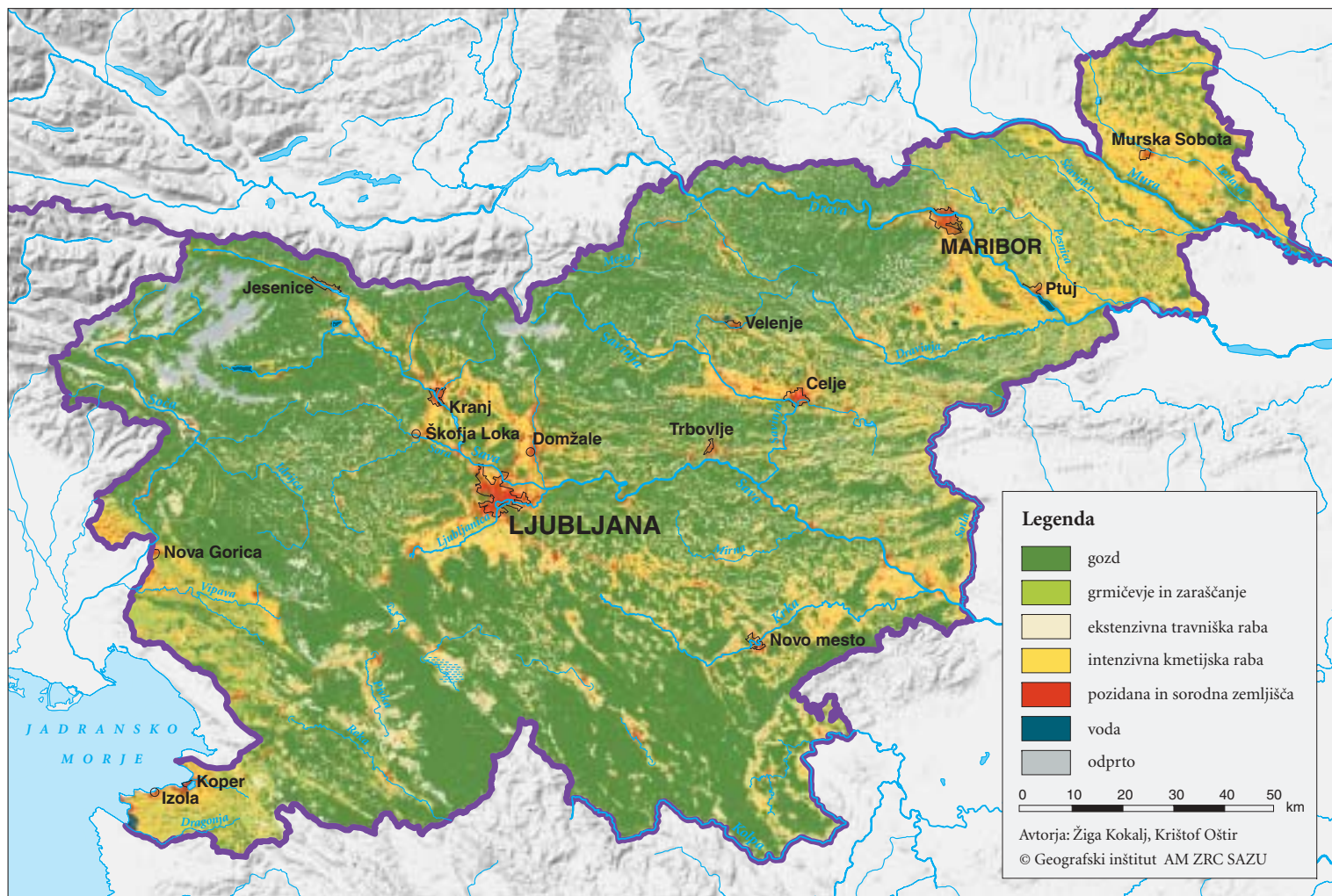
Temeljni vir mnogim študijam so podatki zemljiškega katastra, ki ga vodi Geodetska uprava Republike Slovenije (Gabrovec in Kladnik 1997, 15–18). Evidenca katastra je sestavljena iz digitalnega grafičnega in digitalnega atributnega dela, katerih vzdrževanje poteka na krajevni ravni, in sicer na posameznih krajevnih geodetskih upravah. Raba tal se vodi za vsako najmanjšo enoto – parcelo. Glavna slabost katastra je stalno (ne)sistematično zaostajanje pri registraciji številnih sprememb, saj nikoli ne prikazuje dejanskega stanja (Kladnik 1999, 73); evidentirana raba tal se od dejanskega stanja loči v povprečju med 10 in 20 % (Petek 2001, 10).

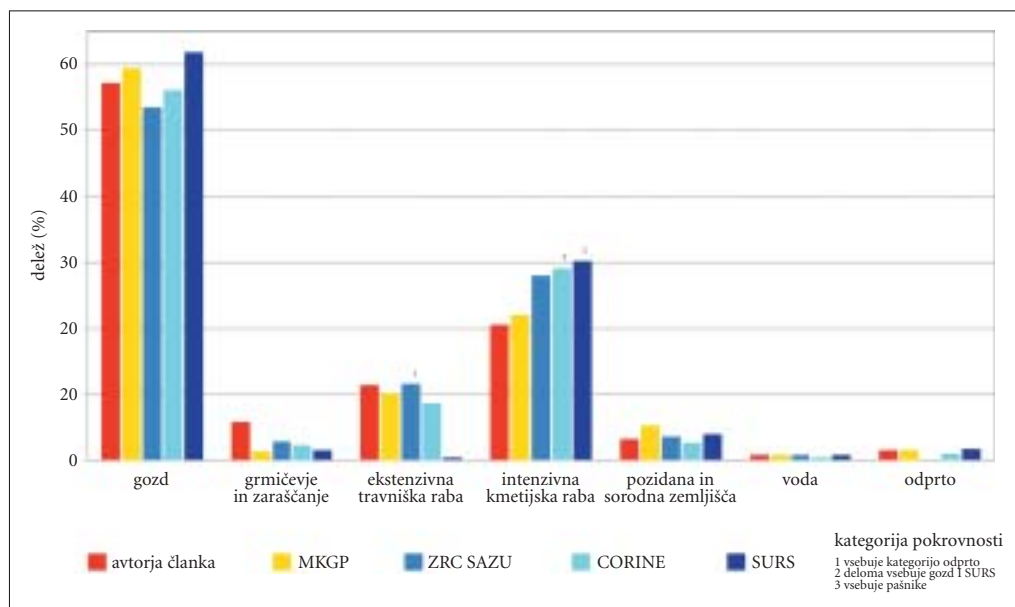
Na Ministrstvu Republike Slovenije za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano so izdelali lokacijsko natančne in za potrebe raziskav lahko dostopne podatke o rabi kmetijskih zemljišč. Ločijo 21 razredov rabe tal, izvedeni pa so bili na podlagi vizualne interpretacije digitalnih posnetkov ortofoto. Po drugi strani je za projekt izdelave rabe tal takšne ali podobne kakovosti za večje območje (na primer celotno državno ozemlje) potrebno izjemno veliko finančnih sredstev in vloženega dela. Zaradi različnih let snemanja posameznih posnetkov podatki niso časovno primerljivi, težave pa ponekod nastopijo tudi na stikih, saj ima zaradi subjektivne interpretacije ista raba na dveh posnetkih različen atribut (Kokalj 2004, 7–8).

Posebne odlike sloja pokrovnosti CORINE so zelo natančno določena metodologija in razdelitev kategorij na tri ravni ter časovna in prostorska primerljivost na evropski ravni. Osnovni vir podatkov so bili ortorektificirani satelitski posnetki Landsat, sloj pokrovnosti pa je bil pridobljen z vizualno interpretacijo. Pomembnejši pomanjkljivosti sta najmanjša velikost kartiranih območij in najmanjša širina poligona, ki se odražata v mešanih kategorijah in v veliki meri izpuščenih oblikah.

Statistični GIS pokrovnosti in rabe tal, izdelan na Statističnem uradu Republike Slovenije, združuje klasifikacijo posnetkov Landsat ter primerjavo in prekrivanje rezultata s pomožnimi zbirkami vektorskih podatkov. Dobra stran je metodološka razčlenjenost in poznavanje metapodatkov virov, iz katerih je bil zemljevid izdelan (Šabić in ostali 1998, 233–242).

Slika 1: Zemljevid pokrovnosti Slovenije.





Slika 2: Primerjava različnih slojev pokrovnosti Slovenije.

Na Inštitutu za antropološke in prostorske študije Znanstvenoraziskovalnega centra Slovenske akademije znanosti in umetnosti je bil za potrebe načrtovanja omrežja mobilne telefonije izdelan sloj pokrovnosti s klasično nadzorovano klasifikacijo satelitskih posnetkov Landsat. Kategorije so opredeljene glede na ovoiro, ki jo predstavljajo za potovanje elektromagnetnega signala. Karta ne prikazuje le ozemlja Slovenije temveč tudi pet kilometrski obmejni pas (Oštir in sodelavci 2000).

Omenjeni podatkovni sloji so bili izdelani na podlagi drugačnih virov in z različnimi metodami; zaradi različnih namenov se razlikujejo njihova kakovost ter opredelitve in število kategorij. Pomembna razlika je v času, ki je bil potreben za njihovo izdelavo, v številu ljudi, ki so sloj izdelovali, in potrebnih finančnih sredstvih. Odločitev za izdelavo novega sloja pokrovnosti izhaja iz želje po večji homogenosti rezultata glede na vir in metodo. Temu lahko zadosti uporaba satelitsko zaznanih podob. Samodejna klasifikacija namreč omogoča izdelavo kakovostnega sloja pokrovnosti večjih območij z delom posameznika v nekaj mesecih, v nasprotju z ročnim načinom, ki v enakih razmerah lahko traja več let.

3 Klasifikacijska shema in klasificiranje posameznih kategorij pokrovnosti

Da bi bila klasifikacija čim bolj uspešna, je treba podatke predhodno ustrezno pripraviti, kar stori v procesu predobdelave. Predobdelava obsega postopke, ki pripravijo podatke za nadaljnjo analizo, ponavadi z namenom odpravljanja ali zmanjševanja sistematičnih napak. Ločimo tri skupine operacij (Campbell 1996, 116):

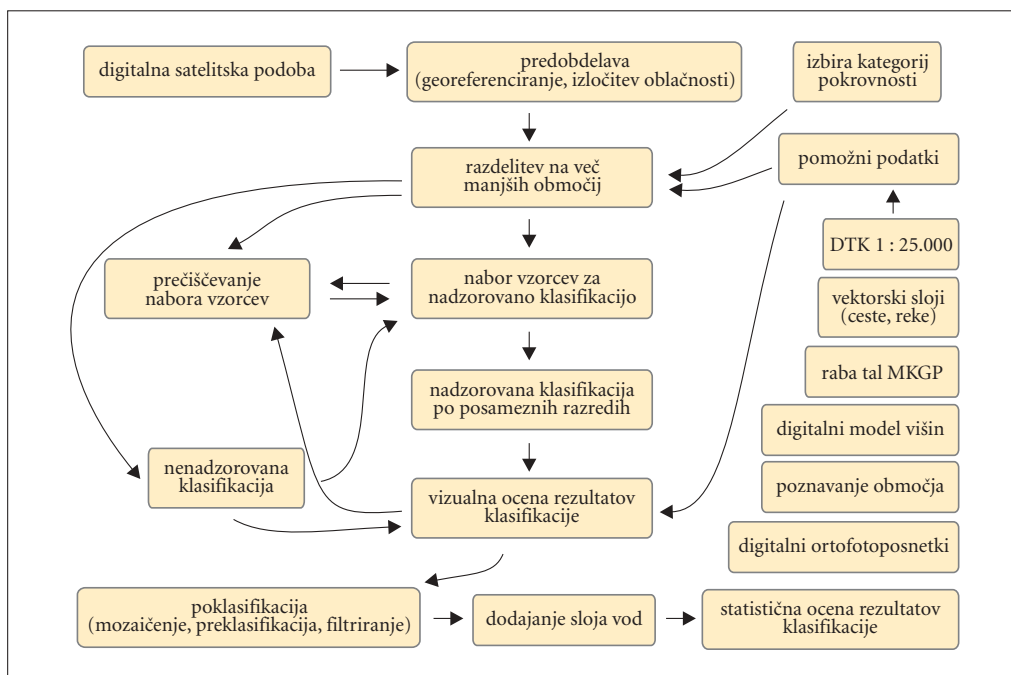
- operacije izboljšanja podob z namenom lažje vizualne interpretacije (na primer sprememba histograma, filtriranje, povzemanje),
- operacije, ki odpravijo radiometrične napake, ki so lahko posledica napak v delovanju senzorja, atmosferskih motenj, variacije kota snemanja, variacije v osvetljenosti ali sistemskega šuma, in
- operacije, ki odpravijo lokacijske napake v odnosu med posnetki.

Kot temeljni vir pri izdelavi sloja pokrovnosti so bili uporabljeni trije georeferencirani posnetki sistema Landsat (iz let 1999 in 2000), prevzorčeni na ločljivost 25 krat 25 m. Posnetek zahodne Slovenije v visokogorju vsebuje velik del oblačnosti, ki je bila izločena z uporabo podobe oddaljenosti pripisane kategorije od povprečja vrednosti učnih vzorcev. Območja so bila nadomeščena s klasifikacijo starejšega posnetka (iz leta 1992).

Ozemlje Slovenije je bilo z namenom preprostejše, predvsem pa učinkovitejše in natančnejše klasifikacije razdeljeno na šest manjših neenakih območij (kvadrantov), v katerih je bil glede na reliefno izoblikovanost in pričakovano pokrovnost poudarek na klasifikaciji različnih kategorij. Le tako je moč v večji meri zaobjeti posebnosti in razlike, ki so posledica reliefne razčlenjenosti, drobne zemljiškoposestne strukture, pestrosti kamninske in pedološke sestave, mikroklimatskih razmer in podobnega. Spektralni podpis kategorij pokrovnosti je namreč prostorsko odvisen, zato ima ista kategorija (na primer grmičevje) na različnih lokacijah različen spektralni podpis, pri čemer se lahko le-ta na določenih območjih približa drugim kategorijam (na primer gozdu, vinogradom, sadovnjakom).

Še pred začetkom samega postopka klasifikacije je treba izbrati in definirati kategorije pokrovnosti. Raven podrobnosti klasifikacije je odvisna od mnogih dejavnikov, na primer namena kartiranja, potrebovanih informacij, prostorske in radiometrične ločljivosti senzorja, okoljskih lastnosti preučevanega območja, analitičnih tehnik, ki naj bi jih uporabili, in podobnega (Apan 1997, 1030). Ponavadi je treba zaradi omejitev pri razpoložljivem času in sredstvih skleniti kompromis pri številu kategorij, saj s tem zmanjšamo zapletenost obdelave in poobdelave. V nadaljevanju so naštetje uporabljene kategorije pokrovnosti in kaj naj bi v idealnih razmerah ločevanja vsebovale:

- gozd (listnati, iglasti in mešani gozd);
- grmičevje in zaraščanje (grmičevje, prehod iz gozda v travnik, zaraščajoči travniki, nizki (predvsem kraški) gozd, ruševje);
- ekstenzivna travniška raba (pašniki in košenice, visokogorsko travinje, barjanski travniki);



Slika 3: Shema poteka pridobitve sloja pokrovnosti.

- intenzivna kmetijska raba (njive z različnimi kulturami, vrtovi, vinogradi, sadovnjaki, hmeljišča, intenzivni travniki, čredinski pašniki);
- pozidana in sorodna zemljišča (mesta, vasi, industrijske površine, širše prometnice in parkirišča, gradbišča);
- voda (morje, jezera, zaježitve, reke, soline);
- odprto (skalnato visokogorje, kamnolomi in peskokopi).

Zaradi že omenjenih omejevanih dejavnikov, ki otežujejo klasifikacijo, se skušamo dejanskemu stanju le kolikor mogoče približati.

Prvi in najpomembnejši korak v procesu nadzorovane klasifikacije je izbira učnih vzorcev, to je območij z znanim tipom pokrovnosti. Operater jih praviloma označi na računalniškem zaslonu, lahko pa uporabimo tudi druge metode omejevanja, na primer terenski zajem koordinat s pomočjo sistema globalnega pozicioniranja. Program za obdelavo posnetkov nato izračuna spektralni podpis tipa pokrovnosti. V opisanem primeru so bili učni vzorci določeni s samodejnim in ročnim omejevanjem, kategorija odprto pa je bila pridobljena naknadno v procesu poklasifikacije. Zaradi različnih dejavnikov, ki vplivajo na časovno in prostorsko spremenljivost spektralnih podpisov (Lillesand in Kieffer 1994, 21), so bili učni vzorci določeni za vsak kvadrant ter satelitski posnetek posebej, enaki so bili uporabljeni le na nekaterih območjih prekrivanja. Kakovost vzorcev je bila iterativno preverjena z več analizami (grafična predstavitev spektralnih odbojev vzorcev, analiza ločljivosti vzorcev, prekrivanje v spektralnem prostoru, samoklasifikacija in testna klasifikacija manjših območij), neustrezni vzorci pa so bili zamenjani. Kot glavni klasifikator je bila uporabljena metoda največje verjetnosti, saj imajo njene dobre lastnosti, zlasti velika točnost, bistveno prednost pred slabimi, na primer občutljivostjo na kakovost učnih vzorcev.

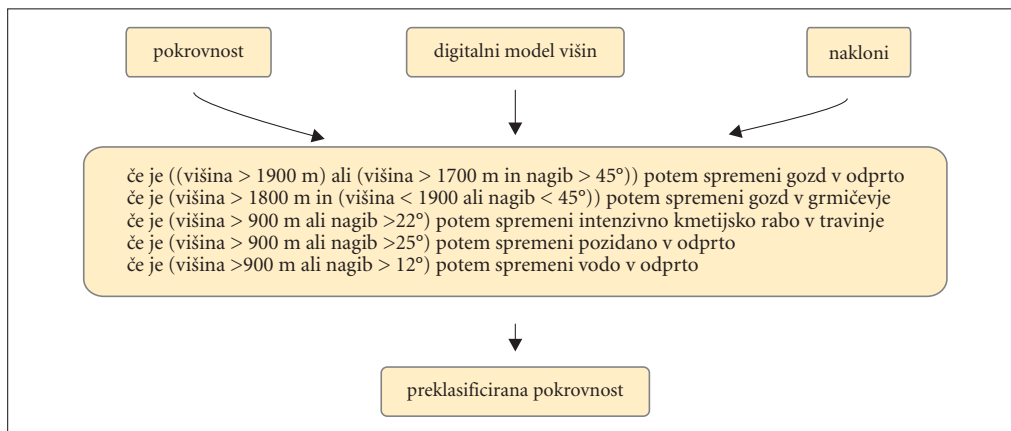
Klasifikacijo smo skušali izboljšati z upoštevanjem dodatnih slojev: digitalnega modela višin in iz njega izračunanih naklonov, normiranega diferencialnega vegetacijskega indeksa (NDVI), pankromatskega kanala. Kot poseben sloj so bili dodani spektralnim kanalom, najprej vsak posebej in nato še vsi skupaj. Pankromatski kanal je bil uporabljen tudi za izboljšanje ločljivosti večspektralnih kanalov. Rezultati niso bili zadovoljivi, saj je na podlagi vizualne interpretacije mogoče soditi, da so manj točni kot klasifikacija brez dodanih slojev. Omeniti je treba, da so bila za učne vzorce uporabljena enaka območja kot pri prvotni klasifikaciji. Klub temu menimo, da je na tem področju potrebna podrobnejša raziskava ter da bi bolj premišljena razpostavitve učnih vzorcev, prilagojena tudi višinam in predvsem naklonu, lahko prinesla boljše rezultate.

4 Poklasifikacija in ovrednotenje rezultata

Težave pri klasifikaciji pokrovnosti so se pojavile predvsem pri ločevanju grmičevja od zemljišč z intenzivno kmetijsko rabo. Zaradi podobnosti in prepletanja spektralnih podpisov omenjenih kategorij je bilo pri določevanju učnih vzorcev treba uporabiti številne metode preverjanja njihove primernosti. Podobno težavo je predstavljalo razlikovanje med pozidanimi zemljišči in zemljišči z odkrito prstjo, vendar je bila dokaj uspešno premoščena z »mehko« klasifikacijo v dva sloja. Ta celicam v prvem sloju pripiše najbolj verjetno pripadnost določenemu učnemu vzorcu in celicam v drugem sloju najbolj verjetno pripadnost enemu izmed preostalih učnih vzorcev. Celicam, ki so bile v prvem sloju označene kot pozidana zemljišča in v drugem sloju kot katera druga kategorija, je bil atribut spremenjen v kategorijo iz drugega sloja.

Po opravljeni klasifikaciji so bili kvadranti ponovno združeni v mozaik, pri čemer so bila glavna vodila vizualno ugotovljena kakovost klasifikacije, starost posnetka in meje pokrajinskoekoloških tipov (Špes in sodelavci 2002).

Z upoštevanjem pomožnih informacij, pridobljenih iz knjig, zemljevidov, statističnih tabel, terenskega dela ali drugih virov, je mogoče kakovost klasifikacije dodatno izboljšati. Pisno gradivo se lahko nanaša neposredno na opazovano območje ali na druga, včasih zelo oddaljena, a geografsko sorodna območja s podobnimi ekološkimi, talnimi, klimatskimi, vegetacijskimi in reliefnimi lastnostmi. Pridobljene infor-



Slika 4: Odločitveno drevo omejevanja kategorij z višino in naklonom.

macije lahko upoštevamo že med samim procesom klasifikacije, če pa to ni mogoče oziroma ne pri-
nese pričakovanih rezultatov, pa tudi v poklasifikaciji v obliki odločitvenega drevesa.

Kakovost klasifikacije v študiji je bila izboljšana z omejevanjem razredov z višino in strmino pobočij.
Mejne vrednosti so bile ugotovljene s pregledom literature (Gams 1960; Krajevni leksikon Sloveni-
je 1995, 9–10; Vrišer 1995, 37; Perko 1998, 84; Kladnik 1999, 124–125; Perko 2001, 82–132), odločitveno
drevo omejevanja pa prikazuje slika 4.

S preklasifikacijo se površinsko najbolj poveča kategorija odprto, in sicer največ na račun pozida-
nih in sorodnih zemljišč. To je pričakovano, saj ta kategorija ni bila posebej klasificirana, pač pa naj bi
bila izločena prav v poklasifikacijskem procesu. Iz gozda so se v odprto preklasificirala predvsem območ-
ja na severni, torej senčni strani gorskih grebenov, saj je bila tam njihova klasifikacija največkrat nepravilna.
Nekoliko izstopa povečanje zemljišč z ekstenzivno travniško rabo (za 6,7 %), kar potrjuje težavno raz-
ločevanje v primerjavi s kategorijo intenzivne kmetijske rabe.

Za izločitev »šuma« in s tem delno generalizacijo je bilo uporabljeno filtriranje z upoštevanjem oko-
lice. Običajen filter velikosti 3 krat 3 celice spremeni robove in se ne izogne posamičnim celicam, zato
je bil prilagojen tako, da je celicam, ki v bližnji okolici nimajo pokrovnosti iste kategorije, pripisal vred-
nost, ki se v njihovi okolici največkrat pojavi (slika 5).

Analiza rezultatov filtriranja pokaže, da je najbolj razpršena kategorija grmičevje in zaraščanje, saj
se je njena površina pri filtriranju zmanjšala kar za 8,8 %. Vzrok gre iskati v prepletanju oziroma podob-
nosti spektralnih podpisov grmičevja z gozdom na eni ter intenzivno kmetijsko rabo in ekstenzivno
travniško rabo na drugi strani. Trditev lahko potrdimo s podatkom, da se je več kot 94 % razpršenih
celic s kategorijo grmičevje prefiltriralo v eno od omenjenih kategorij. Prav tako izstopa zmanjšanje
deleža pozidanih površin za 3,9 %. Večina zmanjšanja je šla na račun intenzivne kmetijske rabe, kar
ponovno govori o težavnosti ločevanja med zemljišči z odkrito prstjo in pozidanimi zemljišči.

Natančnost zemljevida, ocenjena na podlagi 800 vzorčnih točk, primerjanih s stanjem na posnet-
kih ortofoto, presega 92 %, kar je zelo dober rezultat (Foody 2002).

Podrobnejša analiza natančnosti (preglednici 1 in 2) razkrije, da v negativnem smislu najbolj izsto-
pa klasifikacija kategorije grmičevje in zaraščanje, pri čemer odstopanje v negativnem smislu ni povezano
s preklasifikacijo in filtriranjem. Kot grmičevje sta bili največkrat napačno klasificirani kategoriji gozd
in intenzivna kmetijska raba, kar izhaja iz že večkrat omenjene podobnosti v spektralnem podpisu. Tudi
grmičevje je bilo napačno klasificirano kot intenzivna kmetijska raba, kot gozd pa le redko, iz česar je
mogoče sklepati, da so bili učni vzorci omejeni s favoriziranjem grmičevja napram gozdu, medtem ko
so »moči« med grmičevjem in intenzivno kmetijsko rabo razporejene enakomerneje. Enako velja za



Slika 5: Različni načini filtriranja: pokrovost brez filtriranja (levo), filtriranje celotne slike s filtrom večine velikosti 3 krat 3 (na sredini), izločevanje posamičnih celic in nadomeščanje njihovih vrednosti s filtri večine (desno). V izogib težavam pri filtriranju robov predstavljajo slike izreze večjih podob.

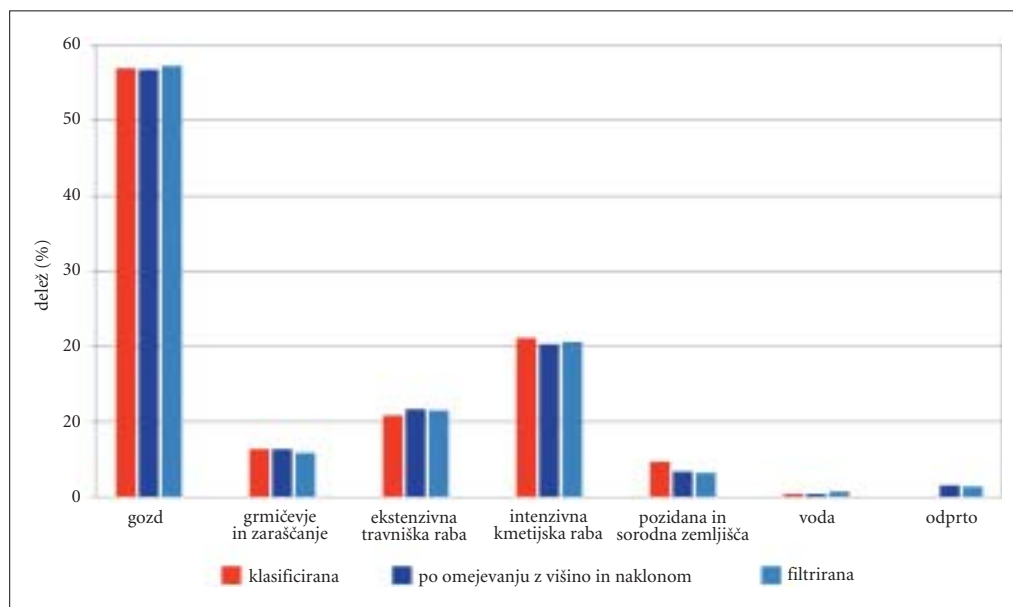
kategoriji ekstenzivna travniška raba in intenzivna kmetijska raba. Območja, ki so bila napačno klasificirana kot pozidana in sorodna zemljišča, so predvsem intenzivna kmetijska zemljišča (zemljišča z odkrito prstjo, na primer zorane njive) ter gozd in kategorija odprto (kamnolomi z naklonom manjšim od 25°, peskokopi, gramozne jame, prodišča ob rekah ...). V kategoriji odprto je zajetega tudi nekaj gozda in grmičevja (ruševja). To bi bilo mogoče rešiti le s posebno klasifikacijo gorskih območij ali zahtevnejšo poklasifikacijo, ki bi upoštevala še usmerjenost površja in kombinacije med naklonom, usmerjenostjo, višino ter drugimi pomožnimi podatki. Vendar bi bila za to potrebna dodatna raziskava, ki bi meje lahko tudi kvantitativno opredelila. Kljub temu bi točnost klasifikacije izboljšala le malenkostno.

Preglednica 1: Ocena natančnosti.

razred	referenčne točke	klasificirane točke	pravilno klasificirane točke	izdelovalčeva natančnost v %	uporabnikova natančnost v %
gozd	329	316	312	94,8	98,7
grmičevje in zaraščanje	84	81	67	79,8	82,7
ekstenzivna travniška raba	99	107	94	95,0	87,9
intenzivna kmetijska raba	145	147	128	88,3	87,1
pozidana zemljišča	65	68	59	90,8	86,8
voda	19	20	19	100,0	95,0
odprto	59	61	58	98,3	95,1
skupaj	800	800	737		

Preglednica 2: Matrika napak.

razred	1	2	3	4	5	6	7	skupaj klasificirane točke
1 gozd	312	1	2	1				316
2 grmičevje in zaraščanje	6	67	2	6				81
3 ekstenzivna travniška raba	4	4	94	5				107
4 intenzivna kmetijska raba	3	10	1	128	5			147
5 pozidana zemljišča	3			5	59		1	68
6 voda					1	19		20
7 odprto	1	2					58	61
skupaj referenčne	329	84	99	145	65	19	59	800



Slika 6: Primerjava pokrovnosti po klasifikaciji, po omejevanju z višino in naklonom ter po končanem filtriranju.

5 Sklep

Klasifikacija satelitskih posnetkov se je izkazala kot učinkovito orodje pri določanju pokrovnosti Slovenije. Z njo je mogoče v razmeroma kratkem času opraviti kartiranje celotnega državnega ozemlja (tudi okolice) in v primeru periodične obdelave opazovati časovni razvoj dogajanja. Uporabljeni posnetki sistema Landsat so primerni za ločevanje od deset do dvajset kategorij pokrovnosti z ločljivostjo 25 m. Zaradi raznovrstnosti pokrajinske rabe in naravnih potez pokrajine, predvsem velike zemljiške razdrobljenosti, spremenljivih talnih razmer in intenzivnega zaraščanja, je ločevanje nekaterih razredov težavno in je treba uporabiti naprednejše metode, vključno s poklasifikacijo.

Omejevanje z višino in naklonom ter izboljšava ločljivosti kategorij s klasifikacijo v dva sloja lahko znatno izboljšajo kakovost končne karte pokrovnosti. Atributna natančnost izdelane klasifikacije, ocenjena s primerjavo stanja na posnetkih ortofoto na podlagi večjega števila testnih točk, je zelo visoka, saj presega 90 %. Največkrat napačno klasificirana kategorija je grmičevje in zaraščanje.

Kakovost izdelanega sloja je zelo dobra, zlasti za študije na regionalni ali državni ravni, mogoče pa jo je dodatno izboljšati zlasti s klasifikacijo po manjših prostorskih območjih (pokrajinskoekoloških tipih ali enotah), z zahtevnejšo poklasifikacijo, ki bi upoštevala še druge spremenljivke (na primer usmerjenost pobočij in osončenost) ter njihove kombinacije, in natančnejšo, s študijo podprto, kvantitativno opredelitvijo mej posameznih razredov. Uporabnost odločitvenega drevesa bi se še povečala z aplikacijo na manjših prostorskih enotah. Tako bi lahko na primer ločevali spremenljivo višino zgornje gozdne meje po regijah.

Opravljen študija je potrdila domnevo, da enostavna klasifikacija pokrovnosti ni mogoča, če želimo doseči visoko natančnost. Izkazalo se je, da je določanje pokrovnosti izrazito prostorsko opredeljeno, saj je treba upoštevati vse lokalne posebnosti, tako naravnih pojavov in danosti kot umetnih objektov. Zato menimo, da je pokrovnost smiselno določati glede na manjše pokrajinske enote. Med zanimivejša

vprašanja za nadaljnje raziskave sodi tudi uporabnost visokoločljivih (prostorsko in spektralno) satelitskih in letalskih sistemov za podrobnejše razlikovanje naravnih in antropogenih značilnosti slovenskih pokrajin.

6 Viri in literature

- Apan, A. A. 1997: Land cover mapping for tropical forest rehabilitation planning using remotely-sensed data. *International journal of remote sensing* 18-5. New York.
- Campbell, J. B. 1996: Introduction to remote sensing. New York.
- Foody, G. M. 2002: Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment* 80. Elsevier.
- Gabrovec, M., Kladnik, D. 1997: Nekaj novih vidikov rabe tal v Sloveniji. *Geografski zbornik* 37. Ljubljana.
- Gams, I. 1986: Osnove pokrajinske ekologije. Ljubljana.
- Kladnik, D. 1999: Leksikon geografije podeželja. Ljubljana.
- Kokalj, Ž. 2004: Vrednotenje pokrajinskoekoloških tipov Slovenije v luči pokrovnosti, pridobljene s klasifikacijo satelitskih posnetkov Landsat. Diplomsko naloga, Oddelek za geografijo, Filozofska fakulteta, Univerza v Ljubljani. Ljubljana.
- Krajevni leksikon Slovenije. Ljubljana, 1995.
- Oštir, K. 2004: Daljinsko zaznavanje. Ljubljana.
- Oštir, K., Stančič, Z., Podobnikar, T., Vehovar, Z. 2000: Pridobivanje in uporaba prostorskih podatkov visoke ločljivosti pri načrtovanju omrežja mobilne telefonije. *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 1999–2000*. Ljubljana.
- Perko, D. 1998: Nadmorske višine površja. *Geografski atlas Slovenije*. Ljubljana.
- Perko, D. 2001: Analiza površja Slovenije s stometrskim digitalnim modelom reliefa. *Geografija Slovenije* 3. Ljubljana.
- Petek, F. 2001: Vrednotenje rabe zemljišč v slovenskih pokrajinah z vidika kazalcev sonaravnega razvoja. Magistrsko delo, Oddelek za geografijo, Filozofska fakulteta, Univerza v Ljubljani. Ljubljana.
- Šabić, D., Lojović, E., Tretjak, A., 1998: Statistični GIS pokrovnosti in rabe tal Slovenije z oceno spremembe pokrovnosti tal med letoma 1993 in 1997. *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 1997–1998*. Ljubljana.
- Špes, M., Cigale, D., Lampič, B., Natek, K., Plut, D., Smrekar, A. 2002: Študija ranljivosti okolja. *Geographica Slovenica* 35, 1-2. Ljubljana.
- Vrišer, I. 1995: Agrarna geografija. Ljubljana.

7 Summary: Land cover map of Slovenia from Landsat satellite imagery

(translated by the authors)

The presented digital land cover map production method uses Landsat satellite imagery and combines different classification methods with employment of ancillary data, of which digital orthophotos and digital elevation model are the most important. The principal data sources were three orthorectified Landsat images from 1999 and 2000, resampled to resolution 25×25 m. The area of Slovenia was divided into different size rectangles, as this facilitates inclusion of differences and particularities that are the consequence of terrain uniqueness, complex cultivation patterns, variety in pedological and geological conditions, rapid overgrowing, microclimate, and similar. Unsupervised classification was used to clarify the basic knowledge about natural organization of data and to determine homogeneous surfaces for definition of supervised classification training samples. Training samples for selected categories (forest, bushes and overgrowth, intensive agriculture, extensive grasslands, build up and similar

areas, water) were obtained by automatic (region growing) and manual delineation, whereas the category open was produced in the postclassification step. The quality of training samples was iteratively tested with multiple analyses; unsuitable samples were changed or dropped. Maximum likelihood method was used as the main classifier, because of its benevolent characteristics, mainly good accuracy, have substantial advantages over negative ones, e.g. sensitivity to the quality of training samples. Individual rectangles were mosaicked after the classification, with a special consideration of visually ascertained classification quality, recentness of imagery, and borders of landscape-ecological types. Altitude and inclination were used to reclassify intensive agriculture, forest, build up areas, and water. »Noise« was removed using adapted majority filter. The filter was set to identify isolated pixels and assign them a value that appears in their vicinity the most often. The attribute precision of the classification, based on 800 test points evaluated by comparing the situation on orthophotos, is very high as it exceeds 92%.

Considerable difficulties in separation of bushes from intensive agriculture were encountered. Because of spectral signature similarities and their mixing several methods of their suitability testing were required. The problem of distinction between build up areas and bare soil was successfully solved by classification into two classes. With this a two layer land cover image was obtained; the first layer represents the most probable land cover class and in the second layer the next most probable class. The value was changed to the pixels that were determined as build up in the first layer and as any other category in the second layer.

Ancillary data, such as normalised difference vegetation index (NDVI), panchromatic band, digital elevation model, and inclination, did not enhance the classification when added to the six spectral bands. However, a detailed investigation might provide favourable results. Experiment should be attempted in a small area, where special attention can be paid to the training samples selection adapted to the altitude and inclination characteristics. Nevertheless, supplementary data proved very useful in the post-classification process with limiting the altitude and slope. The effectiveness of the approach can be enhanced by applying it on a smaller area. For example, maximum forest altitude can be considered according to region. Other criteria, such as exposition and solar radiation, can also be regarded. However, the principal weakness to the method is complex quantitative limits determination.