

Daljinsko zaznavanje invazivnih rastlin *Remote Sensing of Invasive Plants*

Domen OVEN¹

Izvleček:

Oven, D.: Daljinsko zaznavanje invazivnih rastlin; *Gozdarski vestnik*, 76/2018, št. 4. V slovenščini z izvlečkom in povzetkom v angleščini, cit. lit. 65. Prevod Breda Misja, jezikovni pregled slovenskega besedila Marjetka Šivic. Razmah satelitske tehnologije, laserskega skeniranja in računalniške zmogljivosti v zadnjih desetletjih omogočajo uporabo novih metod za prepoznavanje invazivnih rastlinskih vrst. Slednje vplivajo na ohranjenost ekosistemov, saj podirajo vzorce obnašanja med organizmi, zmanjšujejo biodiverzitetu in hkrati povzročajo ekonomsko škodo. Tehnologije daljinskega pridobivanja podatkov (ortofoto, multispektralni, hiperspektralni posnetki in lidarski podatki) omogočajo proučevanje vegetacije na večji prostorski ravni ter so tako uporabni za prepoznavanje invazivnih rastlin in za izdelavo napovednih modelov njihovega razširjanja. Invazivne rastline od domorodnih lahko ločimo na podlagi fenoloških, spektralnih in strukturnih lastnosti. Metode strojnega učenja so ene izmed pogostejših metod, ki so v rabi za prepoznavanje invazivnih rastlin na podlagi daljinsko zajetih podatkov. Uspešno prepoznavanje je v največji meri odvisno od lastnosti posnetkov in opazovanih rastlin. Daljinsko pridobljeni podatki omogočajo spremljanje časovne in prostorske dinamike razširjanja invazivnih organizmov, kar je ključno pri ocenjevanju potencialnega prostorskega širjenja posameznih invazivnih vrst in pri njihovem upravljanju ter posledično za sprejemanje odločitev načrtovalcev in okoljevarstvenikov. V članku so predstavljane najpogostejše lesnate invazivke in njihova razširjenost v Sloveniji, metode klasifikacij daljinskega zaznavanja invazivk, uspešnost prepoznavanja posameznih metod ter prednosti in slabosti daljinskega zaznavanja invazivnih rastlin.

Ključne besede: daljinsko zaznavanje, invazivne rastline, satelitski posnetki, multispektralni posnetki, lasersko skeniranje

Abstract:

Oven, D.: Remote Sensing of Invasive Plants; *Gozdarski vestnik (Professional Journal of Forestry)*, 76/2018, vol. 4. In Slovenian, abstract and summary in English, lit. quot. 65. Translated by Breda Misja, proofreading of the Slovenian text Marjetka Šivic.

The development of satellite technology, laser scanning and computer performance in the recent decades have enabled the use of new methods for invasive plant species detecting. The latter ones affect the conservation of ecosystems, since they destroy the behavioral pattern among the organisms, reduce biodiversity and, at the same time, cause economic loss. Technologies of remote data acquiring (orthophoto, multispectral, hyperspectral images, and lidar data) enable to study vegetation on a larger spatial scale and are thus useful for invasive plant species detecting and for forecast models of their expansion. Invasive plants can be distinguished from the native ones on the basis of phenological, spectral, and structural features. The methods of the machine learning are among the more frequent methods, used for invasive plant detecting in the basis of remotely acquired data. A successful detection depends mostly on the image features and the plant observation. Remotely acquired data enable the monitoring of temporal and spatial dynamics of invasive organisms' expansion, which is vital in assessing the potential spatial expansion of individual invasive species and their management, and consequently for making the planners' and environmentalists' decisions. Thus article presents the most frequent woody invasive plants and their distribution in Slovenia, classification methods of invasive plants' remote sensing, successful recognition of individual methods, and advantages and disadvantages of the invasive plants' remote sensing.

Key words: remote sensing, invasive plants, satellite images, multispectral images, laser scanning

¹ D. O., Podpeška cesta 51A, SI-1351 Brezovica pri Ljubljani, Slovenija. domen.oven@gmail.com

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Premeščanje organizmov ni nič novega pod Soncem, saj je človeku znano že vsaj iz antike (Dobson, 1998). Slednje je tudi glavni razlog širjenja invazivnih tujerodnih organizmov, ki so še posebno nezaželeni med naravovarstveniki in ekologi vseh vrst, saj vplivajo na ekologijo (Vilà in sod., 2011) in ekonomijo; spreminjajo strukturo (Asner in sod., 2008) in funkcijo ekosistemov, podirajo vzorce obnašanja med organizmi, povzročijo zmanjšanje raznolikosti v ekosistemu, povzročajo ekonomske izgube (Šinko, 2016: 18), (Rozman, 2016: 186) in škodujejo zdravju ljudi in okolja (Scalera in sod., 2012). V ZDA so ocenili stroške, nastale zaradi invazivnih rastlin, na 137 milijard \$, pri čemer pa niso upoštevali stroškov, ki nastajajo, če bi finančno ovrednotili še izgubljeno domorodno vegetacijo, zmanjšanje biotske raznovrstnosti in estetske funkcije (Huang in Asner, 2009). Zato je smiselno, da bi razvili metode, ki bi omogočale hitro prepoznavo prisotnosti invazivnih organizmov, spremljanje njihovega razširjanja skozi čas, oceno vpliva na okolje in oceno tveganja (Barbosa in sod., 2016). Ocene tveganja temeljijo na napovednih modelih prostorske razširjenosti (ang. *Species distribution model* – SDM), s katerimi predvidevamo potencialno razširjenost vrste, ki jo ugotovimo na podlagi terenskih popisov ali podnebnih podatkov (npr. WorldClim) (He in sod., 2015). Daljinsko zaznavanje nudi možnost zbiranja podatkov iz preteklosti in spremljanje invazivnosti rastlin in živali skozi čas (Bradley, 2014). Z daljinskim zaznavanjem je mogoče ugotoviti kar osemnajst različnih abiotskih (npr. topografija, temperatura) in biotskih (npr. indeks listne površine, prostorska heterogenost vegetacije) kazalnikov (He in sod., 2015), preko katerih je mogoče razlikovati invazivne rastline od preostalih. Pri zatiranju invazivnih rastlin je ključno, da jih odkrijemo v zgodnjih fazah invazivnosti, kadar je njihova frekvenca pojavljanja majhna (De Poorter, 2007) in daljinsko zaznavanje to omogoča (Bradley, 2014). Na podlagi daljinsko zaznavanih podatkov lahko izdelamo nove ali izboljšamo obstoječe modele prostorske razširjenosti rastlin in živali, saj so le-ti ključni pri upravljanju in nadzoru nad

invazivnimi organizmi (Bradley, 2014; He in sod., 2015; Rocchini in sod., 2015).

Desetletja opazovanja zemeljskega površja in posledično arhiviranje podatkov (Landsat, Modis, Spot) v kombinaciji z visokoločljivimi posnetki nudijo možnost proučevanja površja in širjenja organizmov v daljših časovnih obdobjih, kar je uporabno za proučevanje časovne dinamike invazivnih organizmov (He in sod., 2015).

Namen preglednega članka je bralcu predstaviti problematiko invazivnih organizmov, nanizati v Sloveniji prisotne invazivne organizme drevesnih in grmovnih oblik, predstaviti glavne metode ter prednosti in slabosti daljinskega zaznavanja invazivnih rastlin.

2 TUJERODNE INVAZIVNE RASTLINE PRI NAS

2 ALIEN INVASIVE PLANTS IN SLOVENIA

V Evropi naj bi bilo kar 12110 tujerodnih vrst organizmov, približno 400 naj bi se jih pojavljalo v naših krajih, od tega 85 rastlin (DAISIE, 2017). Daskobler in sod. (2016: 127) ugotavljajo, da se v Sloveniji tujerodne vrste pojavljajo na več kot 70 % vseh gozdnih rastiščnih tipov, najpogosteje v obrečnih gozdnih združbah nižinskega in gričevnatega pasu. Za naselitev tujerodnih invazivnih rastlin so najbolj dovzetni degradirani ali spremenjeni habitati (Jogan in sod., 2016). Glede na ocene (Jogan in sod., 2012a) od vseh prisotnih tujerodnih vrst pri nas približno en odstotek postane invazivnih.

V naših krajih in tudi po Evropi so tujerodne drevesne vrste začeli saditi konec 19. stoletja. V naših gozdovih je bil največji obseg sajenja med obema svetovnima vojnoma. Trenutno se pri nas pojavlja od 20 do 25 tujerodnih drevesnih vrst (Kutnar in Pisek, 2012), ki skupaj predstavljajo malo manj kot 1 % celotne lesne zaloge, od tega največ v GGO Murska Sobota (7,05 % lesne zaloge), GGO Sežana (4,53 % lesne zaloge) in GGO Brežice (1,91 % lesne zaloge) (Veselič in sod., 2016: 152). Najpogostejša tujerodna drevesna vrsta je robinija (*Robinia pseudoaccacia* L.), ki je invazivna v Sloveniji. Njena invazivnost se drugače izraža glede na stanje ohranjenosti gozdov, saj se lažje uveljavi v nestabilnih gozdnih sistemih

(Roženberger in sod., 2016: 167), katerih površina pa se v zadnjih letih povečuje, večinoma zaradi pogostejših naravnih motenj.

Razlogi za sajenje tujerodnih dreves so bili različni: pogozdovanje revnih kraških rastišč, vnašanje hitrorastočih vrst (in vrst s kakovostnejšim lesom) za optimiziranje ekonomskih iztržkov, parkovni (estetski) nameni, za potrebe čebelarstva, za vzgojo sviloprejk, za potrebe papirne industrije, smolarjenje itn. (Kutnar in Pisek, 2012). Reichard in White (2001) ugotavljata, da je bila večina lestnatih invazivnih rastlin v ZDA vnesena zaradi hortikulturnih razlogov. Tudi pri nas so okrasne rastline glavni vir rastlin, ki so postale invazivne (De Groot in sod., 2017) in še vedno veliko vrtnarij, vrtnih centrov in drugih trgovin prodaja veliko rastlin, ki so (potencialno) invazivne (Jež, 2009). Poleg pobegov iz vrtov se tujerodne rastline razširjajo še s prevoznimi sredstvi, kot slepi potniki ali pa pri prevozu blaga oziroma se spontano razširijo na novo območje (De Groot in sod., 2017). Po pričakovanjih (Rocchini in sod., 2015) bodo povečane motnje v naravi, nastale zaradi podnebnih sprememb, povečale tveganje vnosa invazivnih organizmov. Zato je pomembno, da pri reševanju težave invazivnih rastlin poznamo njihovo pojavljanje v prostoru in spreminjanje arealov skozi čas (Preglednica 1).

Pri nas naslednje rastline kažejo navečje stopnje invazivnosti: robinija (*Robinia pseudoacacia* L.), dve vrsti zlate rozge (*Solidago canadensis* in *Solidago gigantea*), pelinolistna žvrklja ali ambrozija (*Ambrosia artemisiifolia*), deljenolistna rudbekija (*Rudbeckia laciniata*), topinambur (*Helianthus tuberosus*), pajesen (*Ailanthus altissima*), žlezava nedotika (*Impatiens glandulifera*), dve vrsti dresnika (rod *Fallopia*), japonska medvečka (*Spiraea japonica*), japonsko kosteničje (*Lonicera japonica*) ter iz tropskih krajev izvirajoča vodna solata (*Pistia stratiotes*) (Jogan in sod., 2012). Različni avtorji (Jogan in Strgulc Krajšek (2010), Jogan (2007, 2011), Jogan in sod. (2016: 108), (Daskobler in sod., 2016: 130), De Groot in sod., 2017) omenjajo še številne druge tujerodne vrste, ki bi bile lahko potencialno invazivne, saj so se že uspešno prilagodile okolju. Oblikovan je bil tudi že seznam potencialno invazivnih tujerodnih vrst za gozdove v Sloveniji in obsega 51 vrst rastlin,

7 vrst gliv, 13 vrst žuželk in 7 vrst sesalcev (De Groot in sod., 2017).

3 DALJINSKO ZAZNAVANJE INVAZIVK

3 REMOTE SENSING OF INVASIVE PLANTS

Načeloma podatke o razširjenosti invazivne vrste pridobivamo na podlagi njihovih ekoloških povezav z vegetacijskimi tipi in dominantnimi rastlinskimi vrstami (Hladnik in Kobal, 2016: 160) ali s terenskim popisom in osnovanjem herbarijev, vendar pa pri tem nastajajo napake (Bradley, 2014), kot so: zbiranje lažje dostopnih rastlin (lokacije rastlin korelirajo s prisotnostjo ceste), pretirane ocene vpliva invazivnosti in težavnost popisa večjega območja (Immitzer in sod., 2012). Vedno več raziskovalcev prisega na metode daljinskega zaznavanja (Bradley, 2014), ki zmanjšujejo porabo časa in stroškov (pogojno, več v nadaljevanju) pri pridobivanju podatkov, hkrati so bolj natančni (Kobal in sod., 2014) in omogočajo pridobivanje informacij o vegetaciji na večjih območjih, v manjših časovnih presledkih (odvisno od časovne ločljivosti) (Tuanmu in sod., 2010), z njimi lažje pridobimo informacije s težko dostopnih terenov (He in sod., 2011). Terenske popise redko ponavljamo na večjih območjih, kar onemogoča proučevanje časovne dinamike invazivnosti (He in sod., 2011).

Načelo daljinskega zaznavanja je, da lahko pridobimo informacije o objektu brez fizičnega stika, preko senzorjev, ki so lahko nameščeni na površju za detaljna, lokalna zaznavanja, večinoma pa so na zračnem plovilu ali na satelitu v orbiti (Oštir, 2006). Senzorji se razlikujejo glede ločljivosti, izvora energije in kota zaznavanja; tako ločimo pasivne senzorje (npr. pankromatski, multispektralni in hiperspektralni (He in sod., 2015)), ki za zaznavanje uporabljajo svetlobo iz v okolice, in aktivne senzorje, ki sami ustvarjajo energijo (npr. laser, radar) (Huang in Asner, 2009).

Različni sistemi daljinskega zaznavanja ponujajo različne ločljivosti, ki vplivajo na izbiro vira podatkov. Tako ločimo spektralno, radiometrično, prostorsko in časovno ločljivost (Oštir, 2006).

Pri iskanju najboljše ločljivosti različnih senzorjev večinoma iščemo ravnovesje med ločljivostmi,

Preglednica 1: Seznam invazivnih drevesnih in grmovnih vrst

Table 1: List of invasive tree and shrub species

Latinsko ime	Slovensko ime	Kraj pojavljanja v SLO	Vir
<i>Acer negundo</i>	ameriški javor	povsod, razen dinaridov	Strgulc Krajšek, 2009 Tujerodne ..., 2017
<i>Ailanthus altissima</i> (Mill.) Swingle	veliki pajesen	Goriška, Primorska (urbani predeli), Štajerska	Arnšek, 2009 Strgulc Krajšek, 2010 Lazar, 2013
<i>Akebia quinata</i> (Houtt.) Decne.	čokoladna akebija	Primorska, Ajševica pri Novi Gorici	Glasnovič in Fišer Pečnikar, 2010
<i>Berberis thunbergii</i> (DC.)	Thunbergov češmin	Mostec (Ljubljana)	Jogan in sod., 2016 104
<i>Cornus sericea</i> (L.)	svilnati (sivi) dren	Ljubljanska kotlina, Gorenjska	Bačič in sod., 2015
<i>Cercis siliquastrum</i> (L.)	navadni jadicovec	Obrežje Rižane	Lipičar, 2013
<i>Brousonettia papyrifera</i> (Vent.)	papirjevka	Primorska	Glasnovič in Fišer Pečnikar, 2010
<i>Buddleia davidii</i> (Franch.)	Davidova budleja, metuljnik	Kobarid, soška dolina, Ljubljana, Izola, Šentilj	Jogan in Strgulc Krajšek, 2010
<i>Amorpha fruticosa</i> (L.)	navadna amorfa	vlažni opuščeni travniki, poplavna mesta	Joganin sod., 2012b
<i>Lonicera japonica</i> (Thunb.)	japonsko kosteničevje	Primorska, Nova gorica (Panovec)	Glasnovič, Fišer Pečnikar. 2010
<i>Parthenocissus quinquefolia</i> (L.) Planch.	navadna vinika	enakomerno razširjena, največ v subpanonski regiji	Lazar, 2013
<i>Physocarpus opulifolius</i> (L.) Maxim.	kalinolistni pokovec	obrečna grmišča, gozdni robovi; Notranjska, Dolenjska	Jogan, 2007; Jogan in sod., 2012b
<i>Prunus serotina</i> (Ehrh.)	pozna čremsa	Notranjska, Štajerska	Jogan, 2011 (neobjavljen vir)
<i>Robinia pseudacacia</i> (L.)	robinija	najpogosteje GGO Slovenj Gradec in GGO Kras, GGO Murska Sobota	Kutnar in Kobler, 2013; Rudolf, 2004
<i>Spiraea japonica</i> L.f.	japonska medvejka	Spodnja Vipavska dolina, Pohorje, okolica Ljubljane in Celja	Jogan, 2009; Lazar, 2013; Tujerodne ..., 2017
<i>Thuja orientalis</i> (L.)	vzhodni klek	Primorska, Štajerska, Goriško	Jogan in sod., 2012b

saj je lahko z večjo kakovostjo ene manjša kakovost preostalih (Oštir, 2006; He in sod., 2015).

Daljinsko zaznavanje temelji na proučevanju spektralnih odbojev vidne in bližnje infrardeče svetlobe od površja opazovanega objekta. Daljinsko lahko zaznavamo preko satelitskih ali letalskih posnetkov, nastale posnetke pa razvrščamo v hiperspektralne posnetke, multispektralni

posnetke in zračne fotografije, odvisno od proučevanega spektra svetlobe in ločljivosti pikslov (Huang in Asner, 2009).

Letalski posnetki zagotavljajo nizko spektralno resolucijo najpogosteje na območju vidne svetlobe in bližnjega infrardečega dela spektra; imajo dobro prostorsko resolucijo, so finančno ugodni, omogočajo razlikovanje med rastlinami, predvsem

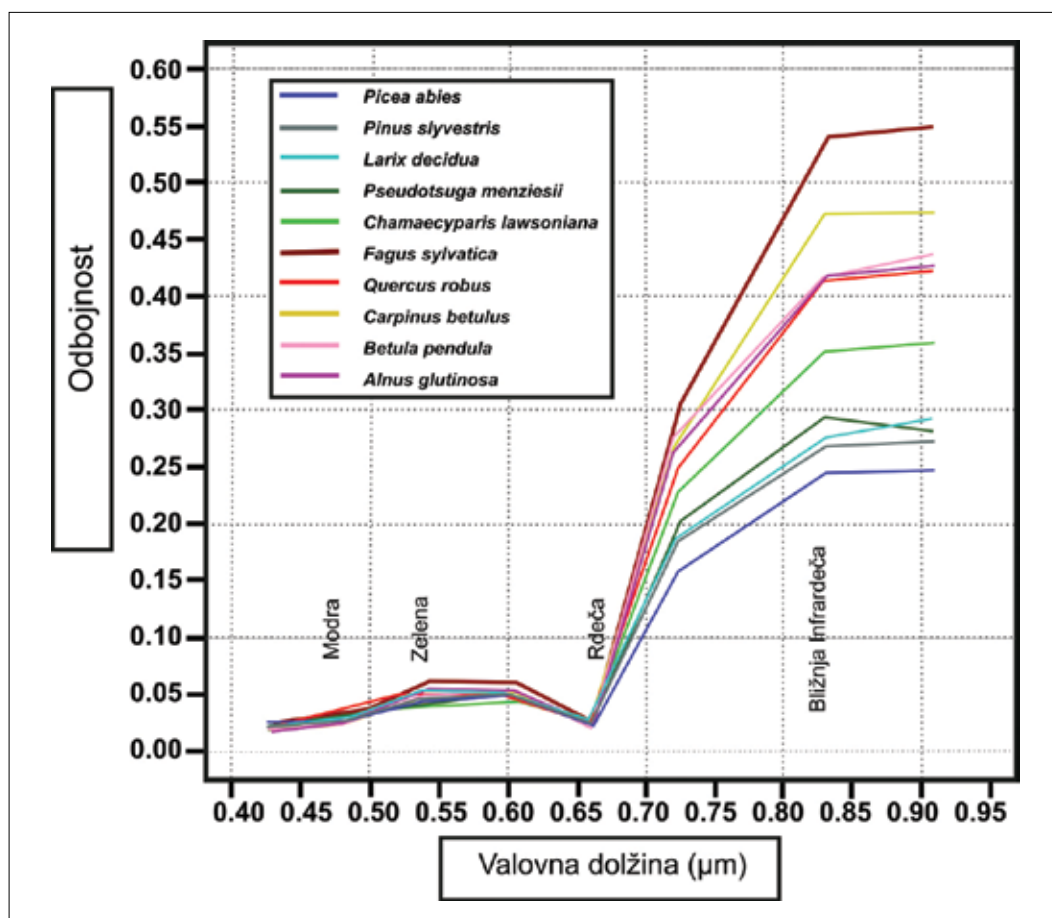
preko fenoloških razlik. Multispektralni senzorji navadno zajemajo od 4 do 10 spektralnih pasov vidne in nizkovalovne infrardeče svetlobe. Gre za posnetke satelitov, ki so že dolgo v uporabi in katerih posnetki so poceni, zato so primerni za izvajanje metod proučevanja fenoloških razlik (Bradley, 2014).

O hiperspektralnih posnetkih govorimo, ko je spekter zaznavanja širok, kjer zaznavanje zajema svetlobne spektre vidne svetlobe in spektre svetlobe, ki so blizu infrardečim sprektom z več sto spektralnih pasov in ozkim spektralnim intervalom (<10 nm) (Huang in Asner, 2009). Najpogosteje so v rabi senzorji AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer), CASI

(Compact Airborne Spectrographic Imager), HyMAP in Hyperion (več v Prilogi 1). Hiperspektralni posnetki omogočajo razlikovanje invazivnih in domačih vrst preko spektralnih profilov, torej različnih frekvenc odboja med vrstami (Slika 1).

Invazivne rastline je tako mogoče razlikovati preko proučevanja spektralnih in teksturnih razlik na slikah, preko različnih fenologij rastlin (Asner in sod., 2008; Müllerová in sod., 2017), preko kemijske sestave listov ter preko ugotavljanja vsebnosti vode v listih (Bradley, 2014; Rocchini in sod., 2015).

Fuller (2005) navaja, da je zaznavanje invazivnega drevesa *Melaleuca quinquenervia* z multispektralnimi posnetki IKONOS s 4 m ločljivostjo neprimerno, saj nastajajo napake pri prepozna-



Slika 1: Spektralni podpis nekaterih dreves (prirejeno po Immitzer in sod., 2012). Značilen način odboja elektromagnetnega valovanja v odvisnosti od valovne dolžine imenujemo spektralni podpis (Oštir, 2006).

Figure 1: Spectral inventory of some trees (adapted after Immitzer et al., 2012). The typical reflection manner of electromagnetic waves depending on wave length is called spectral signature (Oštir, 2006).

vanju posameznih krošenj dreves, in poudarja, da so posnetki IKONOS primerni za večje in gostejše sestoje. Natančnejšo oceno bi pridobili z uporabo hiperspektralnih posnetkov. Večja spektralna ločljivost je primerna za zaznavanje individualnih osebkov (He in sod., 2011), manjše ločljivosti pa pridejo prav v kasnejših stadijih invazivnosti (Bradley, 2014). Asner in Vitousek (2005) navajata, da so bile v invazivni rastlini povečane koncentracije dušika in vode v krošnji in bil je večji indeks listne površine (angl. Leaf area index - LAI). Dobra lastnost za prepoznavanje uspešnih invazivk je, da oblikujejo monotipske sestoje oziroma rastejo v velikih gostotah, kar omogoča lažjo prepoznavnost (Bradley, 2014).

Prednost daljinskega zaznavanja je prosta dostopnost podatkov, kar velja za satelite MODIS, Landsat, Sentinel-2, vendar ponudniki zagotavljajo premalo natančne prostorske ločljivosti, ki so nujne za natančno določanje invazivnih rastlin, ki se v centralni Evropi pojavljajo v manjših zaplatah. Boljšo prostorsko ločljivost bi pridobili z uporabo posnetkov satelitov Pleiades, Worldview, Quickbird, vendar s precej večjim finančnim vložkom (Priloga 1) in negotovostjo zaradi oblačnosti. Nove možnosti daljinskega zaznavanja se odpirajo z mobilnimi laserskimi sistemi skeniranja (brezpilotniki ali 'droni'), katerih uporaba je cenejša, prilagodljivejša in lažja, predvsem glede uporabe in dostopnosti različnih terenov, kljub temu pa imajo svoje pomanjkljivosti (Müllerová in sod., 2017).

3.1 PREPOZNAVANJE PREKO SPEKTRALNIH RAZLIK POSNETKOV

3.1 IDENTIFICATION THROUGH SPECTRAL DIFFERENCES OF THE IMAGES

Spektralne razlike v odboju svetlobe je mogoče najlažje določiti s hiperspektralnimi kamerami, ki prepoznajo razlike v pigmentaciji, vsebnosti vode in kemijski sestavi listov. Različno obarvanost rastlin opazamo, ko imajo rastline različno vsebnosti klorofila, ki se odraža v vidnih barvnih razlikah na listih ali cvetovih. Pigmentiranost lahko določamo tudi z multispektralnimi posnetki. Z omenjenimi metodami ni mogoče ugotavljati

invazivnih vrst v podrasti, če le-te ne spreminjajo kemijske vsebnosti strehe sestoja (Asner in Vitousek, 2005). Načeloma so omenjene metode v rabi za iskanje invazivnih rastlin v grmiščih ali traviških oziroma vegetaciji, katere višina je enaka oziroma je en višinski sloj (Bradley, 2014). Za zaznavanje vrst v podstojni plasti se bolje izkaže lidarska tehnologija (Singh in sod., 2015) (Korpela, 2008, povzeto po Tuanme in sod., 2010), vendar pa je prav tako pomemben čas pridobivanja podatkov, saj so v omenjenem primeru (Singh in sod., 2015) obravnavali vednozeleni grm (*Ligustrum sinensis* Lour.) jeseni, ko nadstojno drevje ni imelo listov.

3.2 PREPOZNAVANJE PREKO RAZLIK V TEKSTURI

3.2 IDENTIFICATION THROUGH DIFFERENCES IN TEXTURE

Metoda temelji na prepoznavanju posebnih teksturnih vzorcev ali objektov na posnetku. Za uspešno prepoznavanje morajo imeti invazivne rastline drugačno obliko in gostoto od preostalih rastlin (Bradley, 2014). Pri objektni analizi je za uspešno prepoznavanje posameznih osebkov pomembna velikost piksla. Tako je mogoče z visoko ločljivostjo posnetka prepoznati tudi manjše rastline (Blumenthal in sod., 2007). Velikost piksla letalskih in satelitskih posnetkov je pogosto 1 m, torej je metoda uporabna za prepoznavanje dreves ali grmov, katerih krošnja je večja od 1 m² (Bradley, 2014).

Teksturna in objektna analiza potekata z vizualno klasifikacijo ali s strojnimi učenjem (Bradley, 2014) in slednje omogoča boljše rezultate, če iščemo invazivna drevesa v grmiščih ali traviških (Pearlstone in sod., 2005). Pearlstone in sod. (2005) navajajo, da je lahko usposobljen analitik fotografij natančnejši od avtomatizirane računalniške identifikacije, vendar pa porabi bistveno več časa za določitev.

3.3 PREPOZNAVANJE PREKO RAZLIK V FENOLOGIJI

3.3 IDENTIFICATION THROUGH DIFFERENCES IN PHENOLOGY

Invazivne rastline imajo drugačno fenologijo od domorodnih rastlin, zaradi česar imajo navadno prednost, da postanejo invazivne, saj prej cvetijo, prej odganjajo, so vednozeleni. Slednje je tudi

razlog, da jih ravno zato ločimo od preostalih, če ujamemo časovni okvir, kjer so razlike največje med vrstami (npr. zgodaj spomladi, pozno jeseni) (Bradley, 2014). Fenološke spremembe lahko iščemo na letalskih, hiperspektralnih in visoko ločljivih multispektralnih posnetkih. Metoda je primernejša za prepoznavanje gostih in večjih zaplat, preko fenoloških razlik pa je mogoče kartirati tudi podstojne invazivne rastline, saj invazivne rastline večinoma kasneje odvržejo liste (Bradley, 2014). Somodi in sod. (2012) so lažje prepoznali robinijo (*Robinia pseudoacacia* L.) preko digitalnih ortofoto posnetkov kot z uporabo posnetkov satelita Landsat. Zaradi specifične fenologije bi bilo pri nas mogoče razlikovati veliki pajesen (*Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle) (Hladnik in Kobal, 2016: 162). Navadno fenološke razlike iščemo v večkratnem snemanju istega območja in sledenju spremembam (He in sod., 2011).

3.4 LASERSKO SKENIRANJE

3.4 LASER SCANNING

Lidarski sistem za opazovanje gozda deluje v bližnjem do srednjem infrardečem spektralnem območju. S pulznim lidarskim snemanjem lahko rekonstruiramo digitalni model reliefa (DMR) (Kobler, 2011), gradimo virtualne 3D-modele zaznanih objektov (Mongus in sod., 2013), uspešno ločujemo iglavce od listavcev (Hamraz in sod., 2018), računamo sestojne parametre, mogoče je ugotoviti tudi višino drevesa, širino in globino krošenj (Kobal in sod., 2014), biomaso in indeks listne površine dreves (Lefsky in sod., 2002). Zaenkrat ločevanje drevesnih vrst z valovnim lidarjem še ne zagotavlja sprejemljive natančnosti (Bruggisser in sod., 2017).

Lidarske podatke je mogoče združiti tudi z multispektralnimi ali hiperspektralnimi posnetki, saj to poveča natančnost določanja krošenj dreves (Ali in sod., 2008) oziroma izboljša ocene drevesnih višin (Kobler, 2011 cit. po Popescu in Wynne, 2004), vendar na natančnost klasifikacije vpliva heterogenost gozda (Verlič in sod., 2014). Asner in sod. (2008) opisujejo uporabo tako lidarskega sistema kot hiperspektralnih posnetkov (AVIRIS) za določitev invazivnih dreves v havajskem deževnem gozdu. Rosso in sod. (2006) opozarjajo, da sama uporaba lidarskega sistema ni nujno uporabna

metoda za zaznavanje invazivnih rastlin, zaradi premajhnih razlik v strukturi krošenj invazivnih in neinvazivnih rastlin, pri tem pa dodajata, da je mogoče slediti spremembam invazivnih rastlin, ki oblikujejo čiste sestoje.

Zaenkrat ostaja povezovanje lidarske tehnologije in hiperspektralnih posnetkov (Carnegie Airborne observatory - CAO) bolj izjema kot pravilo, saj prihaja do neujemanja pikslov med senzorji (Huang in Asner, 2009), vendar pa najnovejše raziskave (Barbosa in sod., 2016) nakazujejo razvoj v to smer.

3.5 IDENTIFIKACIJADOLOČITEV RASTLIN S POSNETKOV

3.5 IDENTIFICATION OF THE PLANTS ON IMAGES

Klasifikacija podob, katerih namen je prepoznavanje predmetov na zemeljski površini, je eden najpomembnejših postopkov pri obdelavi daljinsko zaznanih podob, saj je povezava med daljinskim zaznavanjem in geografskimi informacijskimi sistemi (GIS) (Oštir, 2006). Ločimo vizualno (nadzorovano) klasifikacijo, kjer človek ločuje zaključene skupine pikslov v objekte (npr. tipe rabe tal, drevesne vrste), računalniški program pa na podlagi učnih vzorcev, referenčnih podatkov in statistike (Veljanovski in sod., 2011) klasificira celoten posnetek (Oštir, 2006). Nadzorovana klasifikacija, ki je bolj tradicionalen način interpretacije v daljinskem zaznavanju (Peerbhay in sod., 2016), je pod vplivom odločitev analitika, torej lahko nastanejo določene napake oziroma subjektivne odločitve. Take napake lahko premostimo z uporabo nenadzorovane klasifikacije, kjer združitev v skupine opravi računalnik na podlagi spektralnih, geometričnih, teksturnih, kontekstualnih ali časovnih informacij (Veljanovski in sod., 2011). Digitalno klasifikacijo posnetkov, ki poteka na podlagi spektralnih informacij pikslov, z uporabo različnih algoritmov, imenujemo spektralno prepoznavanje vzorcev (Müllerová in sod., 2017).

Razlikujemo pikselno (pixel based) in objektno klasifikacijo (Object-based analysis – OBIA); prva razvršča piksele v razrede na podlagi njihovega spektralnega podpisa, druga najprej prepozna območja s podobnimi strukturnimi lastnostmi, šele nato jih razvrsti v razrede ob upoštevanju

različnih atributivnih podatkov (Veljanovski in sod., 2011). Robinson in sod. (2016) trdijo, da je prepoznavanje objektov boljši in lažji (Veljanovski in sod., 2011) način klasifikacije visokoločljivih posnetkov v primerjavi z analizo pisklov, saj pri pikselni analizi nastajajo težave, kot so t.i. efekt soli in popra in šuma zaradi majhnih senc (Alvarez Taboada in sod., 2017 cit. po Van der Sande in sod., 2003; Perea in sod., 2009).

Spektralne posnetke lahko klasificiramo s klasterko analizo (nenadzorovana klasifikacija) (npr. K means, ISODATA), ki temelji na iskanju podobnosti. Pri nadzorovani klasifikaciji operater določi manjša območja z določenimi sestojnimi tipi ali tipi rabe tal, računalniški program pa iz njih izračuna spektralne podpise. Pri razvrščanju pikselov v razrede upošteva povprečja razredov ter varianco in korelacijo med njimi (Oštir, 2006).

Podatki daljinskega zaznavanja so redko normalno porazdeljeni, zato so za klasifikacijo teh podatkov primerni neparametrični nadzorovani načini klasifikacije, kot so Classification and regression tree (CART), Support vector machine (SVM), Artificial Neural Network (ANN), saj ti ne predpostavljajo frekvenčne porazdelitve podatkov (Belgiu in Dragut, 2016). Z metodami strojnega učenja se izognemo tudi pretiranemu prilagajanju (angl. overfitting) in medsebojni korelaciji med spremenljivkami (Kobler, 2011). V daljinskem zaznavanju je za klasifikacijo posnetkov aktualno ansambelsko napovedovanje (Belgiu in Dragut, 2016), kot je sicer pogosto uporabljena metoda tvorjenja ansamblov večciljnih regresijskih dreves (Kobler, 2011), random forest (RF), ki je bila uporabljena za prepoznavanje invazivne rastline preko multispektralnih (Peerbhay in sod.,

Preglednica 2: Metode klasifikacije daljinskega zaznavanja invazivnih rastlin

Table 2: Classification method of invasive plants' remote sensing

Klasifikacijski model/algoritem	Objekt	Avtor	Natančnost klasifikacij (angl. OA) (%)
Nearest Neighbour (NN)	<i>Hakea serices</i>	Alvarez Taboada in sod., 2017	70 – 84 (WorldView-2), 65 75 (UAV)
Maximum likelihood (ML), Support Vector Machine (SVM), Random forest (RF)	<i>Heracleum mantegazzianum</i> , <i>Fallopia sp.</i>	Müllerová in sod., 2017	58 – 94 (ML), 54 – 85 (SVM), 60 – 85 (RF)
Support Vector Machine (SVM), Genetic Algorithm for Rule Set Production (GARP)	<i>Miconia calvescens</i>	Pouteau in sod., 2011	92,5 (SVM) 72,5 (GARP)
Random forest	<i>Solanum mauritianum</i>	Peerbhay in sod., 2016	68 (obrežje reke) 85 (odprta omočja) 91 (gozdni rob)
Minimum distance (MD), Mahalanobis distance (MAHD), Maximum likelihood (ML), Spectral angle mapper (SAM), Mixture tuned matched filtering (MTMF)	<i>Juniperus ashei</i> , <i>Gutierrezia sarothrae</i> , <i>Eichhornia crassipes</i>	Yang in Everitt, 2010	93 (MD), 91 (MAHD), 91 (ML), 87 (SAM), 92, (MTMF)
Random forest (RF), Linearna diskriminantna analiza (LDA)	10 drevesnih vrst (<i>Picea abies</i> , <i>Fagus sylvatica</i> ...)	Immitzer in sod., 2012	Štiri drevesne vrste: 86 – 96 (RF), 85 – 95 (LDA) Deset drevesnih vrst: 69 – 82 (RF), 65 – 83 (LDA)
Support vector machine	<i>Pinus sylvestris</i> , <i>Quercus petraea</i> , <i>Fagus sylvatica</i> , <i>Picea abies</i> , <i>Castanea sativa</i>	Verlič in sod., 2014	58 %

2016) in hiperspektralnih posnetkov (Lawrence in sod., 2006).

Izbira klasifikacijske metode naj bo specifična za vsak primer (Preglednica 2), saj so lastnosti posnetkov in lastnosti opazovane rastline (npr. različna fenologija) ključni dejavniki, ki vplivajo na natančnost klasifikacijskih metod (Müllerová in sod. 2017).

V končni fazi nas pri klasifikaciji zanima še njena natančnost (Preglednica 2), saj je od nje odvisna celotna uporabna vrednost metodologije.

3.6 TEŽAVE DALJINSKEGA PRIDOBIVANJA PODATKOV

3.6 PROBLEMS IN THE REMOTE DATA ACQUIRING

Načeloma pri daljinskem zaznavanju posameznih rastlin nastajajo težave pri izbiri spektralne ločljivosti, neizrazite fenologije in izbiri datuma zaznavanja, kajti od njih je odvisno, če bomo lahko ločili zelene osebke od preostalih, težavno je tudi zaznavanje podstojne rasti (Rocchini in sod., 2015) (Tuanmu in sod., 2010) oziroma, če invazivna drevesa niso vladajoča ali sovladajoča (Hladnik in Kopal, 2016: 162). Senzorji s premajhno ločljivostjo (10 m in več) niso uporabni za razločevanje invazivnih rastlin v sestojih, kjer se le-te pojavljajo posamično (Huang in Asner, 2009). Asner in sod. (2008) navajajo težave zaradi senescence krošenj, odmrlih dreves, razmakov med krošnjami, sencami in razgibanega terena. Če razlikujemo invazivke glede na čas cvetenja (fenologije), napačno določimo vse osebke, ki nimajo cvetov, so poškodovani, objedeni ali pa so že odcveteli (Müllerová in sod., 2017). Ocenjevanje parametrov gozda na podlagi lidarskega snemanja je lažje v položnejšem reliefu borealnih gozdov (Kobler, 2011). Pridobivanje podatkov z visoko resolucijo (hiperspektralnih) je lahko drago (Bradley, 2014), nastajajo geometrične distorzije (Yang in sod., 2003), za združevanje hiperspektralnih in lidarskih podatkov je potrebna zmogljiva računalniška oprema (Huang in Asner, 2009), težava so tudi preobsežne informacije in posledično težavna obdelava podatkov (Huang in Asner, 2009). Pri natančnosti (Singh in sod., 2015) lahko nastajajo naslednje napake: prisotnost drugih rastlin s podobnimi lastnosti (npr.

zimzelenost), podcenjevanje višin dreves (Kobler, 2011), pozicijske napake GPS-naprave pri terenskem popisu, izguba informacij pri pretvorbi podatkov, napake lidarja, učinkovitost metod daljinskega zaznavanja (Preglednica 3), napake prve in druge vrste pri določanju prisotnosti (He in sod., 2015), napake zaradi oblačnosti (Müllerová in sod., 2017). Pettorelli in sod. (2014) poziva k večji dostopnosti s širjenjem novih algoritmov in posledično lažji interpretaciji podatkov. Majhna učinkovitost, težave s klasifikacijo drevesnih krošenj listavcev, strukturna heterogenost (Verlič in sod., 2014) in pomanjkanje inventurnih podatkov otežujejo prepoznavo invazivnih drevesnih vrst pri nas (Hladnik in Kopal, 2016: 164).

4 ZAKLJUČEK

4 CONCLUSION

Invazivne rastline postajajo z vse pogostejšimi motnjami vedno bolj prisotne v naših gozdnih ekosistemih. Tako povečujejo svoj negativen vpliv na delovanje ekosistemov in finančno blaginjo družbe. Pri reševanju problematike invazivnih rastlin je ključno njihovo pojavljanje v naravi, potencialno razširjanje v nove habitate, torej spremljanje dinamike širjenja in oblikovanje napovednih modelov prostorske razširjenosti. Ker se invazivne rastline pojavljajo na večjih prostorskih območjih, je zbiranje njihovih podatkov s terenskimi popisi časovno in stroškovno potratno. Z metodami daljinskega zaznavanja je mogoče pridobiti informacije o invazivnih rastlinah na večjih prostorskih območjih, v krajšem časovnem obdobju, z manjšimi finančnimi vložki in z možnostjo lažjega periodičnega ponavljanja. Invazivne rastline imajo unikatno strukturo, fenologijo in spektralni odboj in po teh informacijah jih ločimo od domorodne vegetacije. Invazivne rastline daljinsko zaznavamo preko letalskih, multispektralnih, hiperspektralnih in lidarskih snemanj površja. Invazivne rastline v poznih stadijih invazivnosti prepoznavamo na aeroposnetkih, posamezne osebke pa je mogoče razlikovati le z dobro prostorsko in spektralno resolucijo, predvsem na multispektralnih in hiperspektralnih posnetkih, ki zajamejo več informacij, vendar otežijo obdelavo podatkov. Podatke lidarskega snemanja je mogoče združiti s podatki

Preglednica 3: Izbrani primeri daljinskega zaznavanja invazivnih rastlin

Table 3: Selected cases of invasive plants' remote sensing

Senzor	Velikost piksla	Število pasov, spekter	Habitat	Proučevana rastlina	Natančnost – Overall accuracy (%)	Avtor
HyMap hiperspektralni posnetki	3,5 m x 3,5m	126, 0,45 μm – 2,5 μm In 15 μm – 20 μm	iglasti gozdovi, grmišča, travišča	<i>Euphorbia esula</i>	> 70	Glenn in sod. (2005)
HyMap	3 m x 3 m	126, 10–20 nm	delta reke	<i>Lepidium latifolium</i> , <i>Eichornia crassipes</i> , <i>Egeria densa</i>	63–75 69–90 60–90	Hestir in sod. (2008)
Probe-1 Hiperspektralni posnetki	3 m x 3 m in 5, x 5 m	128 /	gozd	<i>Euphorbia esula</i> , <i>Centaruea maculosa</i>	86 84	Lawrence in sod. (2006)
Multispektralni Quickbird	2,44 m x 2,44 m	4 /	obrežje reke	<i>Tamarix spp.</i>	91	Carter in sod. (2009)
Lidar in CAO in AVIRIS	0,3–3,5 m	213, 380–2519 nm	deževni gozd	<i>Fraxinus uhdei</i> , <i>Psidium cattleianum</i> , <i>Morella faya</i>	93 (za 7 m ²) 88 (za 2 m ²)	Asner in sod. (2008)
Brezpilotnik (RBG + NIR) in Pleiades 1B in Barvni Ortofoto	5 cm (RGB), 50 cm (NIR), 50 cm, 25 cm	4, 350–1750 nm	gričevja, poplavna ravnica	<i>Heracleum mantegazzianum</i> , <i>Fallopia sp.</i>	~60 oz 100 med cvetenjem 62–83 (odvisno od metode klasifikacije)	Müllerová in sod. (2017)
Worldview-2	2 m	8, 427– 908 nm	obvodna rastišča, gozdni rob, odprta krajina	<i>Solanum mauritianum</i>	68 91 85	Peerbhay in sod., 2016
Worldview-2	2 m	8, 630–1040 nm	delta reke	<i>Prosopis sp.</i>	81–93	Robinson in sod., 2016
CCD kamera in hiperspektralni filter (na letalu Cessna 404)	1,68 m 1,32 m 1,56 m	128, 457–921 nm	gozd, grmišča, jezero	<i>Juniperus ashei</i> , <i>Gutierrezia sarothrae</i> , <i>Eichhornia crassipes</i>	86–94	Yang in Everitt, 2010
Quickbird	2,8 m	4, 450–900 nm	obrežje reke	<i>Arundo donax</i>	80, 95–100 za <i>Arundo donax</i>	Everitt in sod., 2005

multispektralnih in hiperspektralnih snemanj, kar lahko poveča natančnost klasifikacije med drevesnimi oziroma grmovnimi vrstami. Rezultate daljinskega zaznavanja pogosto preverimo še s terenskim popisom.

Pridobljene podobe daljinskega zaznavanja klasificiramo na podlagi pikselske ali objektne klasifikacije; prva razvršča piksele v razrede na podlagi njihovega spektralnega podpisa, druga najprej prepozna območja s podobnimi strukturnimi lastnostmi, šele nato jih razvrsti v razrede, ob upoštevanju različnih atributivnih podatkov. V zadnjem času v daljinskem zaznavanju klasificiramo podatke z uporabo različnih metod strojnega učenja, kot so regresijska drevesa. Izbira klasifikacijske metodologije naj bi bila specifična za vsak primer, torej je za vsako novo opazovano invazivno rastlino v drugačnih okoliščinah treba primerjati učinkovitost različnih metod klasifikacije.

Učinkovitost metod prepoznavanja je od odvisna tudi od gozdne strukture in razgibanosti površja; v strukturno in vrstno bolj homogenih gozdovih je modelno napovedovanje prisotnosti bolj natančno (npr. v borealnih gozdovih). Torej so pri nas pri daljinskem zaznavanju invazivnih rastlin glavne težave: majhna učinkovitost metod, težave s klasifikacijo drevesnih krošenj listavcev, strukturna heterogenost gozda pa tudi pomanjkanje inventurnih podatkov o manj pogostih drevesnih vrstah.

Pri nas imamo najboljše možnosti za prepoznavanje invazivnih drevesnih vrst, kot sta robinija in veliki pajesen, na osnovi unikatne fenologije, torej specifičnega obdobja cvetenja. Sama izbira datuma opazovanja namreč zelo vpliva na uspešnost prepoznavanja invazivne rastline od drugih. Prosta dostopnost satelitskih slik površja z dobro časovno ločljivostjo (npr. Sentinel-2) omogoča priložnost za nadaljne raziskave.

Zaenkrat so metode daljinskega zaznavanja uspešnejše za poznejše invazijske stadije, ko rastline poseljujejo že večja območja in jih posledično lažje prepoznamo. Prihodnost razvoja daljinskega zaznavanja je v učinkovitem prepoznavanju posameznih osebkov, iskanju invazivnih rastlin v zgodnjih fazah invazivnosti, osnovanju natančnejših kart prisotnosti na večjih območjih s spremljanjem časovne dinamike ter boljšem

prepoznavanju nelesnih in podstojnih rastlin.

Kaj bi nam torej prinesle – sicer trenutno popolnoma hipotetične – popolne karte dinamike razširjanja v prostoru in času neke invazivne rastline? Na podlagi razširjanja bi lahko ugotavljali favorizacijo habitatov oziroma uspešnost razširjanja rastline v različnih habitatih. Ugotavljali bi dejavnike, ki pospešujejo in zavirajo razširjanje, dejavnike, ki najbolj vplivajo na preživetje v novih razmerah (npr. stabilnost sestojev, velikost motenj, struktura gozda, talna podlaga ipd.). Posledično bi prilagajali ukrepe na gozdnih in negozdnih površinah v želji, da ne bi z napačnim upravljanjem pripomogli k razširjanju invazivnih organizmov.

5 POVZETEK

Invazivni organizmi spreminjajo strukturo in funkcijo ekosistemov, pri tem pa povzročajo večje ekonomske izgube. Z metodami daljinskega zaznavanja prepoznavamo prisotnost invazivnih organizmov, spremljamo njihovo razširjanje skozi čas, ocenjujemo njihov vpliv na okolje in podamo oceno tveganja. Z daljinsko zaznamimi podatki lahko izboljšamo obstoječe ali ustvarimo nove modele prostorske razširjenosti, kateri so ključni pri upravljanju z invazivnimi organizmi.

V zadnjem stoletju je v Sloveniji na povečanje prisotnosti invazivnih drevesnih in grmovnih vrst najbolj vplival prav človek, saj jih je vnašal večinoma zaradi ekonomskih in estetskih vzrokov. Trenutno je pri nas najbolj pogosta invazivna drevesna vrsta robinija (*Robinia pseudoaccacia* L.), ki se dobro uveljavlja v nestabilnih gozdnih sistemih in veliki pajesen (*Ailanthus altissima* Mill.), kateri je pogost v urbani krajini. Pri nas so pogoste tudi nelesnate invazivne rastline (npr. zlata rozga, peterolistna žvrklja, topinambur), vse skupaj pa razlikujemo 51 rastlin, ki so lahko problematične zaradi invazivnih lastnosti.

Metode daljinskega zaznavanja predstavljajo dobro alternativo bolj klasičnim metodam pridobivanja informacij (ekološke interakcije invazivne vrste z vegetacijskimi tipi in dominantnimi vrstami, terenski popisi) o invazivnih rastlinskih vrstah.

Daljinsko lahko pridobivamo podatke o vegetaciji preko letalskih, multispektralnih, hiperspektralnih in lidarskih snemanj. Kakovost posnetkov daljinskega zaznavanja in posledično ločevanje invazivne

rastline od neizvazivnih je odvisna od prostorske, časovne, spektralne in radiometrične ločljivosti. Invazivne rastline je mogoče razlikovati od avtohtone vegetacije preko spektralnih, fenoloških in teksturnih razlik, pa tudi preko kemijske sestave in vsebnosti vode v listih. Hiperspektralni posnetki imajo dobro spektralno ločljivost, velike prostorske ločljivosti pa lahko dosegamo z lidarskimi, multi-spektralnimi in hiperspektralnimi posnetki.

Invazivne rastline na posnetkih lahko tako ločujemo na podlagi preučevanja lastnosti pikslov ali pa na podlagi razlikovanja objektov iz posnetkov. V zadnjem času se pogosto za klasifikacijo posnetkov daljinskega zaznavanja uporablja metode strojnega učenja.

Pri prepoznavanju invazivnih rastlin s posnetkov daljinskega zaznavanja prihajo do problemov, kot so izbira primerne spektralne resolucije, dneva pridobivanja podatkov (fenologija), premajhna prostorska ločljivost, kar onemogoča prepoznavanje posameznih osebkov invazivnih rastlin.

V naših gozdovih imamo težave z identifikacijo drevesnih vrst predvsem zaradi težav s klasifikacijo drevesnih krošenj listavcev in iglavcev, strukturne heterogenosti, pomanjkanja inventurnih podatkov in nizke učinkovitosti metod daljinskega zaznavanja. Kljub temu, še največji potencial, za razlikovanje invazivnih drevesnih vrst od ostalih, na podlagi različne fenologije, predstavljata drevesni vrsti robinija in veliki pajesen.

5 SUMMARY

Invasive organisms change the structure and function of the ecosystems, thereby causing major economic losses. Using the remote sensing methods we detect the presence of invasive organisms, monitor their expansion through the time, assess their impact on the environment, and present risk estimation. With the remotely sensed data, we can improve the existing spatial distribution models or make new ones, which are vital in invasive organisms' managing.

In the last century, the increase of the invasive tree and shrub species presence has been primarily affected by the man, since they have been introduced mostly for economical and aesthetical reasons. At the moment, the most frequent invasive tree species are black locust (*Robinia pseudoaccacia*

L.), which persists well in the unstable forest systems, and the ailanthus (*Ailanthus altissima* Mill.), which is frequent in the urban landscape. Also, some herbaceous invasive plants (e.g. goldenrod, common ragweed, Jerusalem artichoke) are frequent in Slovenia and we discern a total of 51 plants, which can be problematic due to their invasive features.

The remote sensing methods represent a good alternative to more classic methods of acquiring information about the invasive plant species (ecological interactions of the invasive species with the vegetation types and dominant species, field inventories).

We can remotely acquire data on vegetation through the air, multispectral, hyperspectral, and lidar recordings. The quality of remote sensing images and, consequently, identifying invasive species and non-invasive ones depends on spatial, temporal, spectral, and radiometric resolution. Invasive plants can be differentiated from the indigenous vegetation through spectral, phenological, and textural differences, but also through chemical composition and water content in the leaves. Hyperspectral images present a good spectral resolution and major spatial resolutions can be achieved by lidar, multispectral, and hyperspectral images.

Invasive plants on the images can thus be differentiated on the basis of pixel characteristic study or on the basis of distinguishing objects on the images. Lately, methods of machine learning are often used for classification of remote sensing images.

In identification of invasive plants on the remote sensing images, some problems can occur: e.g. selection of an appropriate spectral resolution, day of data acquiring (phenology), and undersized spatial resolution prevents identification of individual invasive plant specimen.

In our forests, we have troubles identifying tree species primarily due to the problems with classification of tree crowns of deciduous and coniferous trees, structural heterogeneity, lack of inventory data, and low effectiveness of remote sensing methods. Despite this, the largest potential for differentiating the invasive tree species from the other ones on the basis of diverse phenology is represented by the tree species black locust and ailanthus.

6 VIRI

6 REFERNCES

- Ali S., Dare P., Jones S. 2008. Fusion of remotely sensed multispectral imagery and Lidar data for forest structure assessment at the tree level. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, B7: 1089–1094
- Alvarez Taboada F., Paredes C., Julian Pelaz J. 2017. Mapping invasive species *Hakea sericea* using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and WorldView-2 Imagery and Object-Oriented Approach. *Remote Sensing*, 9,913: 1–17
- Arnšek T. 2009. Visoki pajesen (*Ailanthus Altissima* (Mill.)) na Goriškem. Diplomsko delo. Biotehniška fakulteta. Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, Ljubljana, 48 str.
- Asner G.P., Knapp D.E., Kennedy-Bodoin, T., Jones, M.O., Martin R.E., Boardman, J., Hughes F. 2008. Invasive species detection in Hawaiian rainforest using airborne imaging spectroscopy and LIDAR. *Remote sensing of environment*, 112: 1942–1955
- Asner G.P., Vitousek P. 2005. Remote analysis of biological invasion and biogeochemical change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102: 4383–6
- Bačič T., Strgulc Krajšek S., Jogan N. 2015. Sivi dren (*Cornus sericea* L.) nova invazivna vrsta v flori slovenije. *Acta Biologica Slovenica*, 58, 2: 13–31
- Barbosa J.M., Asner G.P., Martin R.E., Baldeck C., Hughes F., Johnson T. 2016. Determining subcanopy *Psidium cattleianum* invasion in Hawaiian forest using imaging spectroscopy. *Remote sensing*, 8, 33: 1–17
- Belgiu M., Dragut L. 2016. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114: 24–31
- Bradley B.A. 2014. Remote detection of invasive plants: a review of spectral, textural and phenological approaches. *Biological invasions*, 16: 1411–1425
- Blumenthal D., Booth D.T., Cox S.E., Ferrier E.C. 2007. Large-scale aerial images capture details of invasive plant population. *Rangeland ecology and management*, 60, 5: 523–528
- Bruggisser M., Roncat A., Schaeppman M., Morsdorf F. 2017. Retrieval of higher order statistical moments from full-waveform LiDAR data for tree species classification. *Remote Sensing of Environment*, 196: 28–41
- Carter G.A., Lucas K.L., Blossom G.A. 2009. Remote sensing and mapping of tamarisk along Colorado river, USA: a comparative use of summer-acquired Hyperion, thematic mapper and Quickbird data. *Remote sensing*, 1: 318–329
- Daskobler I., Kutnar L., Šilc U., Vreš B. 2016. Prisotnost in pogostost tujerodnih rastlinskih vrst v gozdnih rastiščnih tipih Slovenije. V: *Invazivne tujerodne vrste v gozdovih ter njihov vpliv na trajnostno rabo gozdnih virov: zbornik prispevkov posvetovanja z mednarodno udeležbo: Gozdarski študijski dnevi*. Ljubljana. Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 125–141
- De Groot M., Kutnar L., Jurc D., Ogris N., Kavčič A., Marinšek A. Kus Veenvliet J., Verlič A. 2017. Opozorilni seznam potencialno invazivnih tujerodnih vrst v slovenskih gozdovih in možne poti vnosa teh vrst. *Novice iz varstva gozdov*, 10: 8–15
- De Poorter. 2007. Invasive alien species and protected areas, A scoping report Produced for the world bank as a contribution to the global invasive Species programme (GISP), Part I: Scoping the scale and nature of invasive alien species threats to protected areas, impediments to IAS management and means to address those impediments. *The Global Invasive Species Programme*, 27 str.
- DAISIE 2017. Delivering alien invasive species inventories for Europe (DAISIE), European summary, <http://www.europe-aliens.org/europeSummary.do> (5. 10. 2017)
- Dobson M. 1998. Mammal distribution in the western Mediterranean: the role of human intervention. *Mammal Review*, 28, 2: 77–88
- Everitt J.H., Yang C., Deloach C.J. 2005. Remote sensing of giant reed with Quickbird satellite imagery. *Journal of Aquatic Plant Management*, 43 : 81–85
- Fuller D. O. 2005. Remote detection of invasive *Melaleuca* trees (*Melaleuca quinquernea*) in south Florida with multispectral IKONOS imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 26: 1057–1063
- Glasnović P., Fišer Pečnikar Ž. 2010. *Akebia quinata* (Houtt.) Dcne., nova vrsta v slovenski flori, ter prispevek k poznavanju neofitske flore Primorske. *Hladnikia*, 25: 31–43
- Glenn N.F., Mundt J.T., Weber K.T., Prather K.T., Lass L.W., Pettingill J. 2005. Hyperspectral data processing for repeat detection of small infestations of leafy purple. *Remote sensing of Environment*, 95: 399–412
- He K. S., Bradley B. A., Cord A. F., Rocchini D., Tuanmu M.-N., Schmidtlein S., Turner W., Wegmann M. and Pettorelli N. 2015. Will remote sensing shape the next generation of species distribution models? *Sensing in Ecology and Conservation*, 1: 4–18
- Hamraz H., Jacobs N.B., Contreras M.A., Clark C.H. 2018: Deep learning for conifer/deciduous classification of airborne LiDAR 3D clouds representing individual trees. *Cornell University Library. arXiv:1802.08872: 1–27*

- He K.S., Rocchini D., Neteler M., Nagerda H. 2011. Benefits of hyperspectral remote sensing for tracking plant invasion. *Diversity and distributions*, 17: 381–392
- Hestir E.L., Khanna S., Andrew M., Santos M.J., Viers J.H., Greenberg J.A., Rajapakse S.S., Ustin S. 2008. Identification of invasive vegetation using hyperspectral remote sensing in the California Delta ecosystem. *Remote Sensing of Environment*, 12, 11: 4034–4047
- Hladnik D., Kobal M. 2016. Možnosti ocenjevanja širjenja invazivnih drevesnih vrst z daljinskim zaznavanjem. V: *Invazivne tujerodne vrste v gozdovih ter njihov vpliv na trajnostno rabo gozdnih virov: zbornik prispevkov posvetovanja z mednarodno udeležbo: Gozdarski študijski dnevi*. Ljubljana. Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 159–165
- Huang C., Asner G.P. 2009. Applications of remote sensing to alien invasive plant studies. *Sensors*, 9, 6: 4869–4889
- Immitzer M., Atzberger C., Koukal T. 2012. Tree species classification with random forest using very high spatial resolution 8-band WorldView-2 satellite data. *Remote sensing*, 4: 2661–2693
- Jež A. 2009. Zamenjave invazivnih rastlinskih vrst z neinvazivnimi. Študija v sklopu projekta *Invazivne tujerodne vrste-prezrta grožnja* (projekt Thuja), Ljubljana 2009
- Jogan N. in Strgulc Krajšek S. 2010. Izbrane invazivne tujerodne vrste rastlin. V: *Delavnica na MOL*. 17. 10. 2010. http://www.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/podrocja/invazivke/invazivke_mol_2010_izbrane_vrste_izrock_jogan_strgulc.pdf (Neobjavljen vir)
- Jogan N. 2007. Poročilo o stanju ogroženih rastlinskih vrst, stanju invazivnih vrst ter vrstnega bogastva s komentarji. Agencija RS za okolje, Ljubljana 2007
- Jogan N., 2009. Japonska medvejkja, *Spirea japonica*. Informativni list 26. Gradivo Projekta Thuja,
- Jogan N., 2011. Invazivne rastline in gozd. V: *Predavanje*. Ljubljana, 21. 6. 2011. (neobjavljeno).
- Jogan N., Bačič M., Strgulc Krajšek S. 2012a. Tujerodne in invazivne rastline v Sloveniji. *Neobiota Slovenije*: 161–182
- Jogan N., Eler K., Novak Š. 2012b. Priročnik za sistematično kartiranje invazivnih tujerodnih rastlinskih vrst, Zavod Symbiosis in Botanično društvo Slovenije, <http://www.tujerodne-vrste.info/projekti/projekt-thuja-2/Prirocnik-popisovanje-rastlin.pdf> (26. 1. 2016)
- Jogan N., Strgulc Krajšek S., Bačič M. 2016. Tujerodne vrste gozdnih habitatnih tipov in dendroflora Mestne občine Ljubljana. V: *Invazivne tujerodne vrste v gozdovih ter njihov vpliv na trajnostno rabo gozdnih virov: zbornik prispevkov posvetovanja z mednarodno udeležbo: Gozdarski študijski dnevi*. Ljubljana. Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 101–109
- Jogan Nejc. 2011. Invazivne rastline in gozd. Ljubljana, 21. 6. 2011. <http://www.zdravgozd.si/dat/dogodki/24.pdf> (neobjavljen vir)
- Kobal M., Triplatt M., Kranjc N. 2014. Pregled uporabe zračnega laserskega skeniranja površja v gozdarstvu. *Gozdarski vestnik*, 72, 5–6: 235–248
- Kobler A., 2011. Nove metode za obdelavo podatkov laserskega skenerja za monitoring gozdnih ekosistemov. Doktorska dizertacija. Univerza v Ljubljani. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 126 str.
- Kutnar L., Kobler A., 2013. Sedanje stanje razširjenosti robinije (*Robinia pseudoacacia* L.) v Sloveniji in napovedi za prihodnost. *Acta Silvae et Ligni*, 102: 21–30
- Kutnar L., Pisek R. 2012. Tujerodne in invazivne drevesne vrste v gozdovih Slovenije. *GozdV*, 71, 9: 402–417
- Lefsky M.A., Cohen W.B., Parker G.G., Harding D.J. 2002. Lidar remote sensing for ecosystem studies. *BioScience*, 52: 19–30
- Lawrence R.L., Wood S.D., Sheley R.L. 2006. Mapping invasive plants using hyperspectral imagery and Breiman Cutler classifications (Random forest). *Remote sensing and environment*, 100: 356–362
- Lazar K., 2013. Razširjenost invazivnih tujerodnih vrst bregov Vrtojbe in Korna, diplomsko delo, Fakulteta za znanost o okolju, Univerza v Novi Gorici, 40 str.
- Lipičar T. 2013. Razširjenost izbranih invazivnih tujerodnih vrst rastlin v obrežnem pasu reke Rižane. Dipl. Delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Pedagoška fakulteta, kemija Biologija, 70 str.
- Mongus D., Čekada M.T., Žalik B. 2013. Analiza samodejne metode za generiranje digitalnih modelov reliefa iz podatkov lidar na območju Slovenije. *Geodetski vestnik*, 57, 2: 245–259
- Müllerová J., Brůna J., Bartaloš T., Dvořák P., Vitková M., Pyšek P. 2017. Timing Is Important: Unmanned Aircraft vs. Satellite Imagery in Plant Invasion Monitoring. *Frontiers in Plant Science*, 8: 1–13 (887)
- Oštir K. 2006. Daljinsko zaznavanje. Inštitut za antropološke in prostorske študije, Ljubljana, ZRC SAZU, 252 str.
- Pearlstone L., Portier K.M., Smith S.E. 2005. Textural discrimination of invasive plant, *Schinus terebinthifolius*, from low altitude aerial digital imagery. *Photogramm Eng Remote sens*, 71: 289–298
- Peerbhay K., Mutanga O., Lottering R., Ismail R. 2016. Mapping *Solanum mauritanum* plant invasions using WorldView-2 imagery and unsupervised random forests. *Remote Sensing of Environment*, 182: 39–48

- Pettorelli N., Laurance W.F., O'Brien T.G., Wegmann M., Nagendra H., Turner W. 2014. Satellite remote sensing for applied ecologists: opportunities and challenges. *Journal of applied ecology*, 51: 839–848
- Pouteau R., Meyer J.Y., Stoll B. 2011. A SVM-Based model for predicting distribution of the invasive tree *Miconia calvescens* in tropical rainforest. *Ecological Modelling*, 222, 15: 2631–2641
- Reichard S.H., White P. 2001. Horticulture as a pathway of invasive plant introductions in the United states. *Oxford journals. Bioscience*, 51, 2: 103–113
- Robinson T.P., Wardell-Johnson G.W., Pracilio G., Brown C., Corner R., van Klinken R.D. 2016. Testing the discrimination and detection limits of WorldView-2 imagery on a challenging invasive plant target. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 44: 23–30
- Rocchini D., Andreo V., Förster M., Garzon-Lopez C. X., Gutierrez A. P., Gillespie T. W., Haufler H.C., He K. S., Kleinschmit B., Mairota P., Marcantonio M., Metz M., Nagendra H., Pareeth S., Ponti L., Ricotta C., Rizzoli A., Schaab G., Zebisch M., Zorer R., Neteler M.. 2015. Potential of remote sensing to predict species invasions: a modelling perspective. *Progress in Physical Geography*, 39, 3: 283–309
- Rosso P.H., Ustin S.L., Hastings A. 2006. Use of lidar to study changes associated with *Spartina* invasion in San Francisco Bay marshes. *Remote Sensing of Environment*, 100: 295–306.
- Rozman S. 2016. Predstavitev izkušenj z različnimi načini ozaveščanja o problematiki invazivnih tujerodnih vrst. V: *Invazivne tujerodne vrste v gozdovih ter njihov vpliv na trajnostno rabo gozdnih virov: zbornik prispevkov posvetovanja z mednarodno udeležbo: Gozdarski študijski dnevi*. Ljubljana. Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 185–193
- Roženberger D., Nagel T., Brus R. 2016. Potencialna invazivnost robinije (*Robinia pseudoacacia*) in velikega pajesena (*Ailanthus altissima*) v gospodarskih gozdovih Slovenije. V: *Invazivne tujerodne vrste v gozdovih ter njihov vpliv na trajnostno rabo gozdnih virov: zbornik prispevkov posvetovanja z mednarodno udeležbo: Gozdarski študijski dnevi*. Ljubljana. Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 167–175
- Rudolf S. 2004. Robinija (*Robinia pseudoacacia* L.) v severovzhodni Sloveniji. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, BF, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, 82 str.
- Scalera R., Genovesi P., Essl F., Rabitsch W. 2012. The impacts of invasive alien species in Europe. *European Environmental Agency, Technical report No. 16/2012*. Copenhagen: 118 str. <https://www.eea.europa.eu/publications/impacts-of-invasive-alien-species> (27. 2. 2018)
- Singh K.K., Davis A.J., Meentemeyer R.K. 2015. Detecting understory plant invasion in urban forest using LiDAR. *International Journal of Applied Earth observation and geoinformation*, 38: 267–279
- Somodi I., Čarni A., Ribeiro D., Podobnikar T. 2012. Recognition of the invasive species *Robinia pseudoacacia* from combined remote sensing and GIS sources. *Biological observation*, 15: 59–67
- Strgulc Krajšek S., 2009, Davidova budleja (*Buddleja davidii*), Informativni list 22, <http://www.tujerodne-vrste.info/informativni-listi/INF22-davidova-budleja.pdf> (26. 1. 2016)
- Strgulc Krajšek, S., 2009. Amerikanski javor *Acer negundo*, Informativni list 19, Projekt Thuja
- Šinko M. 2016. Ekonomske dimenzije v oblikovanju politik upravljanja z invazivnimi tujerodnimi vrstami – študija primera kostanjeve šiškarice (*Dryocosmus kuriphilus*) v Sloveniji. V: *Invazivne tujerodne vrste v gozdovih ter njihov vpliv na trajnostno rabo gozdnih virov: zbornik prispevkov posvetovanja z mednarodno udeležbo: Gozdarski študijski dnevi*. Ljubljana. Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 17–24
- Tuanmu M.N., Viña A., Bearer S., Xu W., Ouyang Z., Zhang H., Liu J. 2010. Mapping understory vegetation using phenological characteristics derived from remotely sensed data. *Remote sensing of Environment*, 114: 1833–1844
- Tujerodne vrste. <http://www.tujerodne-vrste.info/informativni-listi/INF19-amerikanski-javor.pdf> (26. 1. 2016)
- Tujerodne vrste. <http://www.tujerodne-vrste.info/informativni-listi/INF26-japonska-medvejka.pdf> (26. 1. 2016)
- Veljanovski T., Kanjir U., Oštir K. 2011. Objektivno usmerjena analiza podatkov daljinskega zaznavanja. *Geodetski vestni*, 55,4: 641–664
- Verlič A., Đurić N., Kokalj Ž., Marsetič A., Simončič P., Oštir K. 2014. Tree species classification using Worldview-2 satellite images and laser scanning data in a natural urban forest. *Šumarski list*, 9-10: 477–488
- Veselič Ž., Grecs Z., Matijašič D. 2016. Predlog uporabe nekaterih tujerodnih vrst pri obnavljanju gozdov v Sloveniji. V: *Invazivne tujerodne vrste v gozdovih ter njihov vpliv na trajnostno rabo gozdnih virov: zbornik prispevkov posvetovanja z mednarodno udeležbo: Gozdarski študijski dnevi*. Ljubljana. Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 149–158

- Vilà M., Espinar J. L., Hejda M., Hulme P. E., Jarošík V., Maron J. L., Pergl J., Schaffner U., Sun Y. and Pyšek P. 2011, Ecological impacts of invasive alien plants: a meta-analysis of their effects on species, communities and ecosystems. *Ecology Letters*, 14: 702–708
- Yang C., Everitt J. H. 2010. Mapping three invasive weeds using airborne hyperspectral imagery. *Ecological Informatics*, 5, 5: 429–439
- Yang C., Everitt J.H., M.R. Davis. 2003. A CCD Camera-based Hyperspectral Imaging System for Stationary and Airborne Applications. *Geocarto International*, 18: 71–80

8 PRILOGE

8 ANNEXES

Priloga 1: Primeri ponudnikov podatkov daljinskega zaznavanja za ZDA (povzeto po Bradley, 2014)

Annex 1: Examples of remote sensing providers for the U.S.A. (after Bradley, 2014)

Snemanje	Senzor	Širina zaje-tega Pasu	Prostorska resolucija	Časovna dostopnost	Časovna ločljivost	Cena
Multispektralno	AVHRR	2600 km	1,1 km	1978	12 ur	Ø
	MODIS	2330 km	250 m – 1 km	2000	1–2 dni	Ø
	Landsat Tm, ETM+	185 km	30 m	1982 – 2011	16 dni	Ø
	Landsat 8	185 km	30 m	2013	16 dni	Ø
	Aster	60 km	15 – 30 m	2000	16 dni	Ø
	SPOT	60 km	2,5 – 20 m	1986	26 dni	Ø ali €
	Ikonos	11 km	1,8 – 4 m	1999	3 dni	€€
	Quickbird	17 km	2,5 m	2001	1–4 dni	€€
	Worldview-2	16 km	1,8 m	2009	1,1 (3,7) dni	€€
	GeoEye-1,2	15 km	1,65 m	2008	2,1–8,3 dni	€€
	Pleiades-1,2	20 km	0,5 m	2011	1 dan	€€
Sentinel-2	290 km	10 m	2015	5 dni	Ø	
Hiperspektralno	Hyperion	7,7 km	30 m	2000	7 dni	Ø
	AVIRIS ²	2 – 11 km	4 – 20 m	1992	po naročilu	Ø ali €€
	AISA ²	različno	različno	trenutna	po naročilu	€€
	CASI ²	različno	do 25 cm	trenutna	po naročilu	€€
	HYMap ²	različno	3 – 10 m	trenutna	po naročilu	€€
Ortofoto ²	NAPP	9 km	1 : 40000	1987 – 2007	več let	€
	NHAP		1 : 80000	1980 – 1989	več let	€
	NAIP	mozaično	1 m	2001	več let	€
	USGS DOQ	mozaično	1 m	odvisno od lokacije	več let	Ø

² Senzor večkrat nameščen na zračnem plovilu

€ – Posnetki letalskih snemanj (ortofoto) stanejo okoli 30 € na posnetek visoke resolucije.

€€ – Večina komercialnih satelitskih posnetkov stane 10–20 €/km², s popustom za znanstvene namene.