DOI: 10.5937/topola2515017V
UDK: 528.8.041.5:712.252

Originalni naučni rad

Multispektralni UAV snimci za detekciju kvantitativnih parametara gradskih drvoreda

Vladimir Višacki[1], Lazar Turšijan[2], Lazar Pavlović[2], Srđan Stojnić[1], Dejan B. Stojanović[1], Lazar Kesić[1], Saša Orlović[1]

[1] Univerzitet u Novom Sadu, Institut za nizijsko šumarstvo i životnu sredinu, Novi Sad, Republika Srbija
[2] Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, Republika Srbija

* Autor za korespodenciju: Vladimir Višacki; E-mail: vladimir.visacki@gmail.com

Datum prispeća rukopisa u uredništvo: 03.05.2025; **Datum recenzije:** 02.06.2025; **Datum prihvatanja rukopisa za publikovanje:** 11.06.2025.

Apstrakt: Monitoring urbanog zelenila predstavlja važan aspekt u planiranju, podizanju, upravljanju i održavanju zelenih površina. Izazovi poput klimatskih promena, intenzivne urbanizacije i povećane koncentracije saobraćaja naglašavaju potrebu za efikasnim metodama praćenja stanja zelenila. Multispektralno snimanje obezbeđuje kvantifikaciju refleksije svetlosti od površine drveća, žbunja ili zatravnjenih površina, definišući je kao multispektralni otisak gde svaki piksel nosi određenu vrednost refleksije dela spektra sunčevog zračenja. Ovaj rad istražuje mogućnost primene multispektralne tehnologije za precizno mapiranje i analizu urbanih zelenih površina, kao napredniju alternativu satelitskim snimcima niske rezolucije (0,5 m/px i 3 m/px). Cilj ovog rada je analiza multispektralnih snimaka u cilju dobijanja karakterističnog multispektralnog otiska različitih vrsta drveća u urbanim sredinama. Kroz proračun relevantnih vegetacijskih indeksa procenjuje se trenutno fiziološko stanje gradskih drvoreda, što omogućava detekciju stresnih faktora i degradacionih procesa.
Istraživanje je pokazalo da različite vrste drveća ispoljavaju karakteristične obrasce refleksije u vidljivom i blisko infracrvenom delu spektra, pri čemu su vegetacijski indeksi poput TVI, CVI i NIRR omogućili pouzdanu diferencijaciju vrsta kao što su divlji kesten, lipa, koprivić i breza. Takođe je utvrđeno da uslovi snimanja, naročito prisustvo senki i intezitet svetlosti, značajno utiču na tačnost podataka, pri čemu se snimanje pri difuznoj svetlosti (npr. u zalasku Sunca) pokazalo kao optimalno. Zaključeno je da multispektralni podaci predstavljaju efikasan alat za detekciju fiziološkog stanja vegetacije i klasifikaciju vrsta u urbanim sredinama, čime se otvara mogućnost za preciznije planiranje, održavanje i intervencije u urbanim ekosistemima.

Ključne reči: drvored, multispektralni snimci, UAV, urbana sredina, zelena površina, vegetacijski indeksi.

Copyright © 2025 Institute of Lowland Forestry and Environment.
This is an Open Access paper distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0) License.

Original scientific paper

UAV-acquired multispectral imagery for detecting quantitative parameters of urban tree lines

Abstract: Monitoring of urban greenery is an important aspect in the planning, construction, management and maintenance of green areas. Challenges such as climate change, intensive urbanization and increased traffic concentration emphasize the need for effective methods of monitoring the state of greenery. Multispectral imaging ensures the quantification of light reflection from the surface of trees, bushes or grassy surfaces, defining it as a multispectral print where each pixel carries a certain value of reflection of part of the spectrum of solar radiation. This paper investigates the possibility of applying multispectral technology for precise mapping and analysis of urban green areas, as a more advanced alternative to low-resolution satellite images (0.5 m/px and 3 m/px). The aim of this work is the analysis of multispectral recordings in order to obtain a characteristic multispectral imprint of different types of trees in urban areas. Through the calculation of the relevant vegetation indices, the current physiological condition of the city's tree rows is assessed, which enables the detection of stress factors and degradation processes.
Research has shown that different tree species exhibit characteristic reflection patterns in the visible and near-infrared part of the spectrum, with vegetation indices such as TVI, CVI and NIRR enabling reliable differentiation of species such as horse chestnut, linden, nettle and birch. It was also determined that recording conditions, especially the presence of shadows and light intensity, significantly affect the accuracy of the data, whereby recording in diffuse light (eg at sunset) proved to be optimal. It was concluded that multispectral data is an effective tool for detecting the physiological state of vegetation and classifying species in urban environments, which opens the possibility for more precise planning, maintenance and interventions in urban ecosystems.

Keywords: tree line, multispectral images, UAV, urban environment, green area, vegetation indices.

1. Uvod

Multispektralne tehnike predstavljaju tehnologije koje se sve češeće primenjuju u analizi urbanog zelenila zbog mogućnosti da, u odnosu na primarno terenski ljudski rad, brže pruže informacije o stanju vegetacije, uključujući i one promene koje nisu vidljive golim okom (Ucar et al. 2017). Ove tehnike zasnivaju se na prikupljanju podataka u različitim delovima spektra svetlosti, uključujući infracrveni spektar, što omogućava identifikaciju različitih fizioloških parametara biljaka, kao što su sadržaj hlorofila, prisustvo stresa usled suše ili bolesti, kao i opšte zdravlje vegetacije. Njihova primena se pokazala posebno korisnom u urbanim sredinama, gde su terenska merenja često ograničena fizičkom dostupnošću i velikim prostornim varijacijama.

Multispektralna tehnika snimanja urbanih sredina od početka se temeljila na konceptu tzv. otiska refleksije, odnosno načina na koji površine reflektuju elektromagnetno zračenje (Boehmsdorff, 2001). Tehnologija je razvijena kao odgovor na potrebu za efikasnim planiranjem, projektovanjem i održavanjem zelene infrastrukture. Takođe, multispektralne metode omogućavaju procenu ispunjenosti urbanih uslova za rast i razvoj biljaka, kao i uočavanje promena koje nastaju u okviru zelenih površina.

Urbanu sredinu čini kompleksan splet različitih subjekata — od stambenih i poslovnih objekata, preko saobraćajne mreže i javnih prostora, do zelenih površina koje igraju ključnu ulogu u kvalitetu života građana. Multispektralna opservacija ovih sredina ima za cilj da na osnovu reflektivnog odgovora objekata u različitim spektralnim opsezima omogući klasifikaciju i razlikovanje tih subjekata. Ovaj reflektivni odgovor, poznat kao multispektralni otisak, zavisi od fizičkih svojstava objekta i njegove površine, a njegova analiza se dodatno unapređuje pomoću geolokacionih podataka.

Rani multispektralni snimci su imali skromnu prostornu rezoluciju (Herold, 2003), te su se rezultati često morali upoređivati sa stvarnim stanjem na terenu. Vremenom je došlo do prelaska na digitalne slike koje kvantitativno beleže refleksiju sunčevog zračenja. Te vrednosti se dalje koriste za izračunavanje vegetacijskih indeksa koji omogućavaju analizu fotosintetske aktivnosti, procenu zdravstvenog stanja vegetacije i uočavanje stresa biljaka (Bargel, 2001; Haralick, 1973).

Danas multispektralni otisak predstavlja jednu od osnovnih karakteristika opserviranog područja, a njegova precizna identifikacija je moguća zahvaljujući visokoj prostornoj i spektralnoj rezoluciji. Svaki objekat — bilo da je reč o zgradi, asfaltu, vozilu ili vegetaciji — ima specifičan multispektralni otisak koji omogućava njegovu klasifikaciju i analizu. Međutim, zbog složenosti urbanog okruženja i brojnosti faktora koji utiču na reflektivnost, javlja se potreba za dodatnim izvorima podataka i unapređenim tehnikama obrade. Kao odgovor na te izazove, u praksu se uvodi kombinacija multispektralnog sa LIDAR i hiperspektralnim snimanjem (Shafri et al. 2019; Huo et al. 2018), čime se postiže bolja definisanost otisaka i veća pouzdanost klasifikacije.

U analizi urbanih sredina koristi se niz formula i modela koji kombinuju različite spektralne opsege, a cilj je razgraničiti subjekte i razumeti njihove karakteristike. Na primer, reflektivne veštačke površine (asfalt, beton, krovovi) mogu uzrokovati pogrešne klasifikacije vegetacije, pa se u savremenim istraživanjima razvijaju specijalizovani i modifikovani vegetacijski indeksi. Lee, Hwang i Cho (2021) predložili su novi vegetacijski indeks razvijen upravo za gradske sredine, koji kombinuje više spektralnih kanala (NDVI, GNDVI, BNDVI, RGBVI, GRVI i SAVI) i pokazuje višu tačnost u razlikovanju vegetacije od ne-vegetacijskih površina.

Uprkos velikom potencijalu multispektralnih snimaka, njihova primena u urbanom kontekstu nosi i određene izazove. Urbanistička raznolikost, promenljive osvetljenosti, senke i kompleksna tekstura objekata često otežavaju detekciju i klasifikaciju. Iako veća rezolucija snimaka omogućava finije detalje, istovremeno otežava interpretaciju zbog izražene heterogenosti površina, što može izazvati nejasnoće pri analizi i povećati troškove obrade (Feng et al. 2020). Kao rezultat toga, razvijaju se složeniji pristupi koji kombinuju spektralne, teksturalne i geometrijske informacije, uz primenu naprednih algoritama mašinskog učenja poput Random Forest metode. Guo et al. (2022) koristili su ovakav pristup za prepoznavanje i razdvajanje urbanih stabala po vrstama na osnovu UAV multispektralnih snimaka, postigavši ukupnu tačnost klasifikacije od 92%.

Multispektralni UAV snimci ne koriste se samo za klasifikaciju vegetacije, već i za procenu njenih kvantitativnih parametara. Na primer, NDVI indeks se koristi za inverziju Leaf Area Index (LAI), čime se omogućava procena gustine lisne mase i strukture krošnji drveća (Zhang et al. 2025). Fairbairn et al. (2025) pokazali su da NDVI i zapremina vegetacije, izračunati iz UAV snimaka, mogu da posluže kao prediktori urbane biološke raznovrsnosti, konkretno bogatstva ptičjih vrsta.

Drvoredi, kao specifičan oblik urbanog zelenila, imaju posebno mesto u ovoj analizi. Oni se definišu kao uskolinearne zelene površine sastavljene od nizova stabala, najčešće duž saobraćajnica. Mogu biti jednoredni, dvoredni ili višeredni, homogeni (sa jednom vrstom) ili heterogeni (sa više vrsta drveća) (Anastasijević, 2011). Drvoredi imaju višestruku ulogu u urbanom prostoru — ekološku (apsorpcija CO_2, filtracija prašine, regulacija temperature), estetsku (povezivanje sa prirodom, vizuelni identitet ulica), kao i funkcionalnu (vođenje saobraćaja, povećanje bezbednosti). Osim što doprinosi smanjenju efekta urbanih toplotnih ostrva, drveće u drvoredu obezbeđuje stanište za ptice, insekte i druge organizme, čineći urbane sredine ekološki održivijim.

S obzirom na svoju linearnu prostornu organizaciju i visoku ekološku vrednost, drvoredi su idealni kandidati za multispektralnu analizu putem UAV snimaka. Sve zelene površine u gradu mogu biti predmet snimanja, jer se lako definišu kroz površinu i geokoordinate. Za manje površine, opservacija se najčešće vrši pomoću drona sa multispektralnom kamerom. Za veće površine (preko 5 ha) i zaštićena područja primenjuju se satelitski sistemi sa multispektralnim i/ili hiperspektralnim senzorima (Kaynarca, 2018; Lynch, 2020). Kombinovanjem rezultata iz oba sistema dobija se uspešna i skalabilna opservacija površine od interesa. UAV snimci se često koriste za kalibraciju i trening modela koji će se primeniti na širim površinama pokrivenim satelitskim snimcima.

Razvojem hiperspektralne nedestruktivne opservacije, otvorene su nove mogućnosti za analizu biljnih vrsta. Sada je moguće precizno razlikovati ne samo grupe vegetacije (drveće, šiblje, trava), već i pojedinačne biljne vrste, što ima poseban značaj za upravljanje urbanim ekosistemima. Ova tehnologija postaje sve popularnija zbog svoje primene u realnom vremenu, koja omogućava pravovremene reakcije na promene u životnoj sredini, kao što su suša, zagađenje, bolesti biljaka i sl. Na osnovu takvih podataka moguće je planirati adekvatne mere — navodnjavanje, zaštitu od štetnih faktora, agrotehničke intervencije — čime se doprinosi očuvanju i unapređenju kvaliteta zelenih površina.

Uzimajući sve prethodno u obzir, cilj ovog istraživanja je da ukaže na mogućnost primene drona i multispektralne kamere u svrhu detaljne analize kvantitativnih pokazatelja različitih drvenastih vrsta u gradskoj sredini, s naglaskom na njihov značaj i funkciju u okviru urbane sredine. U ovom radu analiziran je jedan deo drvoreda, heterogenog tipa, duž Bulevara Vojvode Stepe u Novom Sadu. Na osnovu podataka prikupljenih UAV uređajem opremljenim multispektralnim senzorom, izvršeni su proračuni vegetacijskih indeksa i analizirane osnovne karakteristike zelenih površina. Posebna pažnja posvećena je definisanju linearnih zelenih površina u odnosu na ostale elemente urbane sredine, uključujući građevinske objekte, saobraćajnu infrastrukturu i druge subjekte. Fokus je i na monitoringu rasta i razvoja biljaka - drveća, žbunja i travnatih površina - s ciljem njihove klasifikacije i bolje interpretacije uloge zelenila u unapređenju kvaliteta urbanog života.

2. Materijal i metode

U okviru ovog istraživanja korišćen je UAV multikopter DJI Mavic 3 Multispectral (Mavic 3M), savremena platforma za snimanje visokopreciznih multispektralnih podataka iz vazduha. Ovaj dron je specijalizovan za primenu u preciznoj poljoprivredi i urbanom ekološkom monitoringu, jer kombinuje visoku rezoluciju RGB kamere sa četiri zasebna multispektralna senzora. RGB kamera poseduje CMOS senzor veličine 4/3 inča sa rezolucijom od 20 megapiksela i varijabilnim otvorom blende (f/2.8 do f/11), što omogućava snimanje u različitim svetlosnim uslovima i precizno mapiranje terena. Multispektralni deo senzorskog sistema uključuje četiri kamere, od kojih svaka ima rezoluciju od 5 megapiksela, i pokrivaju zelenu (560 ± 16 nm), crvenu (650 ± 16 nm), crvenu ivicu (730 ± 16 nm) i blisko infracrvenu oblast spektra (860 ± 26 nm). Integrisani sunčev senzor na gornjoj strani drona omogućava kalibraciju reflektovanog zračenja, što znatno povećava tačnost izračunavanja vegetacijskih indeksa poput NDVI, EVI, ili GNDVI. Sunčev senzor meri intezitet sunčevog zračenja na osnovu čega vrši kalibraciju spektra svetlosti koja biva registrovana refleksijom u senzoru multispektralne kamere. Pored toga, Mavic 3M je opremljen RTK (Real-Time Kinematic) modulom koji obezbeđuje geolokaciju snimaka sa centimetrskom preciznošću, čime se eliminiše potreba za postavljanjem zemaljskih kontrolnih tačaka. RTK sistem sinhronizuje podatke o položaju sa trenutkom ekspozicije svake fotografije u mikrosekundama, omogućavajući visoku geolokacionu tačnost. Letelica poseduje autonomiju leta do 43 minuta i u optimalnim uslovima može pokriti do 20 hektara po jednom letu. Stabilan prenos podataka između drona i upravljačkog sistema omogućen je O3 (OcuSync 3.0) komunikacionim sistemom, koji omogućava prenos slike u realnom vremenu na udaljenosti do 15 km. Zahvaljujući kombinaciji preciznog pozicioniranja, visoke prostorne rezolucije i multispektralne detekcije, DJI Mavic 3M se pokazao kao pouzdan alat za monitoring zdravlja vegetacije u urbanim sredinama.

Snimanja multispektralnom kamerom postavljenom na dronu obavljena su u večernjim časovima pred zalazak Sunca u drugoj polovini jula meseca. Lokacija snimanja bio je Bulevar vojvode Stepe, Novi Sad (koordinate: N 45.257167, E 19.801331; N 45.257307, E 19.801089; N 45.256385, E 19.798782; N 45.256793, E 19.799056). Snimanje je sprovedeno u skladu sa važećim pravilnicima o bespilotnim letelicama i lokalnim zakonima. Najzastupljenija vrste drveća na lokalitetu snimanja su bile: koprivić (*Celtis australis* L.), lipa, srebrnolisna lipa (*Tilia tomentosa* Moech.) sitnolisna lipa (*Tilia cordata* Mill.), divlji kesten (*Aesculus hippocastanum* L.) i breza (*Betula pendula* L.)

Snimanje je obavljeno upravno na izvor svetlosti zbog upadnog i odbojnog ugla svetlosti. Brzina kretanja, ugao snimanja i rezolucija od 3 cm/px je u skladu sa preporukama proizvođača

multispektralne kamere i RGB kamere. Veća rezolucija snimanja stvara puno detalja i nemogućnost klasifikacije drvenastih vrsta, jer se detektuje refleksija sa površine koju čine grane ili stablo.

Maskiranje vegetacije izvršeno je pre računanja i interpretacije vegetacijskih indeksa, sa ciljem da se eliminiraju uticaji refleksije sa nevegetacionih površina (asfalt, staklo, vozila, metalni elementi). Proces je realizovan u softverskom paketu QGIS 3.32, korišćenjem raster kalkulatora i kombinovanih pragova vrednosti iz više indeksa.

Konkretno, vegetacijska maska je definisana pomoću sledećih graničnih uslova: CVI > 1.2; NIRR > 2.0; NIRG > 1.8; RG < 1.2; TVI > 800. Pikseli koji su ispunjavali najmanje tri od pet navedenih kriterijuma smatrani su vegetacijom. Ovakav pristup višestruke validacije kroz nezavisne indekse omogućio je bolju diskriminaciju vegetacije u složenim urbanim uslovima i smanjio rizik od pogrešne klasifikacije usled visoke reflektivnosti ne-vegetacionih objekata. Kao dodatna podrška vizuelnoj analizi, korišćena je funkcija "semi-automatic classification plugin" (SCP) u QGIS-u, pri čemu su selektovane oblasti interesa (ROI) koje odgovaraju različitim vrstama na osnovu njihove refleksije u zelenom, crvenom i blisko infracrvenom spektru. Takva procedura omogućila je razlikovanje vrsta kao što su *Celtis australis*, *Tilia cordata*, *Aesculus hippocastanum* i *Betula pendula*, koje su prethodno potvrđene terenskom vizuelnom identifikacijom. Granice stabala su dodatno korigovane kako bi se eliminisali artefakti nastali senkama, refleksijama i prostornim preklapanjem krošnji.

Vrednosti pragova određene su na osnovu preliminarne analize histogramskih raspodela za svaki indeks, kao i vizuelne inspekcije RGB slojeva u zonama sa poznatom vegetacijom. Maskiranje je dodatno potvrđeno terenskim opservacijama i uzorkovanjem (ground truth). Ova binarna vegetacijska maska primenjena je kao filtracioni sloj nad izračunatim indeksima (CVI, NIRR, NIRG, RG, TVI) kako bi se obezbedilo da se dalja analiza sprovodi isključivo nad vegetacionim pikselima (tabela 1).

Tabela 1. Pregled vegetacijskih indeksa korišćenih u analizi multispektralnih snimaka dobijenih pomoću UAV-a.
Table 1. *Overview of vegetation indices used in the analysis of multispectral imagery obtained by UAV.*

Indeks	Formula	Opis i namena
CVI Chlorophyll Vegetation Index	(NIR / Red) × (Green / Blue)	Procena sadržaja hlorofila na nivou krošnje; koristi se za razlikovanje vegetacije prema hlorofilnom sadržaju, Vincini et al. (2008) .
NIRR Near Infrared to Red Ratio	NIR / Red	Jednostavan pokazatelj fotosintetske aktivnosti; veća vrednost ukazuje na zdraviju vegetaciju, Pu et al. (2008).
NIRG Near Infrared to Green Ratio	NIR / Green	Prikazuje vitalnost vegetacije; manje osetljiv na stres u odnosu na NIRR, Gutman et al. (2021).
RG Red to Green Ratio	Red / Green	Ukazuje na žućenje lišća, stres ili stadijume sazrevanja, Glen et al. (2010).
TVI Transformed Vegetation Index	√[(NDVI + 0.5)], gdje je NDVI = (NIR – Red)/(NIR + Red)	Transformisana verzija NDVI-ja; poboljšava diskriminaciju vegetacije i smanjuje uticaj pozadine, Basak et al. (2023).

Spektralne vrednosti refleksije (zelena – G, crvena – R, blisko infracrvena – NIR) izračunate su za svako stablo na osnovu multispektralnih snimaka obrađenih u softverima Pix4D Mapper i QGIS 3.32. Za svaku individuu drveća definisana je zona interesa (ROI), unutar koje su dobijene prosečne vrednosti reflektovanih spektralnih kanala i odgovarajućih vegetacijskih indeksa.

Statistička analiza razlika između vrsta u refleksiji različitih delova spektra sprovedena je u softverskom paketu StatSoft Statistica 13.5. Korišćena je jednofaktorska analiza varijanse (ANOVA) kako bi se utvrdila statistička značajnost razlika u spektralnim vrednostima između analiziranih vrsta

(*Celtis australis*, *Tilia spp.*, *Aesculus hippocastanum*, *Betula pendula*). Naknadno je primenjen Tukey HSD post hoc test radi preciznog određivanja razlika između pojedinačnih vrsta.

Unutrašnja varijabilnost spektralne refleksije izražena je preko koeficijenta varijacije (CV), izračunatog za svaku vrstu i spektralni kanal. Nivo statističke značajnosti postavljen je na $p < 0,05$.

Nakon snimanja, snimci su obrađeni u programu PiX4D (Pix4D SA, Switzerland) Nakon obrade snimaka po preporučenim podešavanja na on-line platformi, računanje vegetacijskih indeksa nastavljeno je u softveru Quantum GIS (v. 3.32). Korišćenjem raster kalkulatora dobijene su vrednosti vegetacijskih indeksa (tabela 1).

3. Rezultati i diskusija

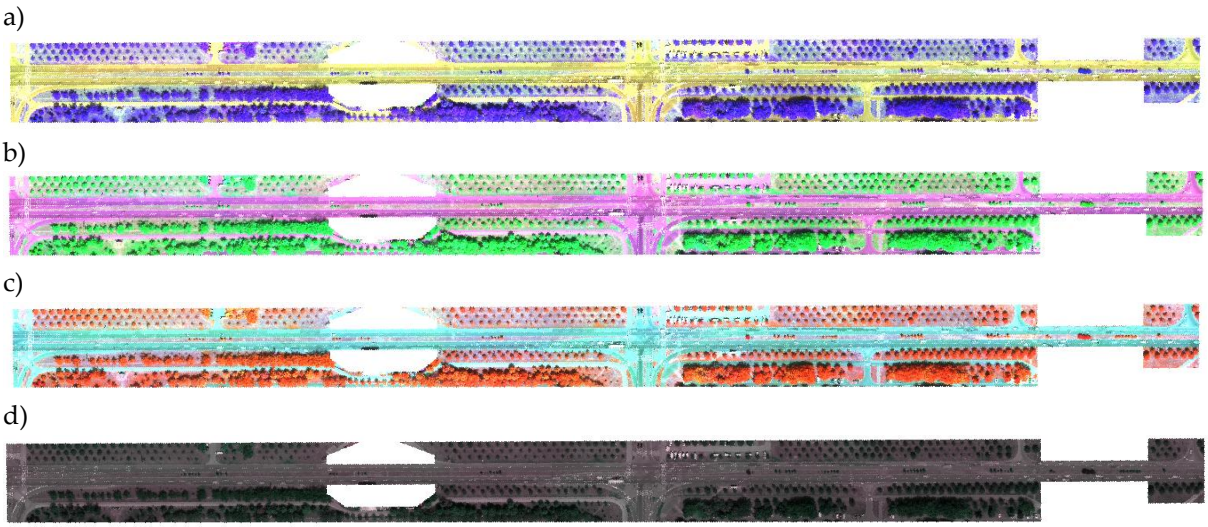
U gradskim uslovima, snimanje miltispektralnom kamerom predstavlja veliki izazov, zbog visoke refleksije svetlosti sa površina automobila, zgrada, generalno stakla i sličnih, uglačanih površina. Pomenuti, takozvani šumovi, značajno utiču na kvalitet snimka, jer u potpunosti menjaju primarnu ili originalnu refleksiju Sunčeve svetlosti sa površine listova. U trenutku snimanja, pomenuti materijali ispoljavaju znatno veći intenzitet refleksije u poređenju sa lišćem drveća, što ne samo da značajno utiče na kvalitet zabeleženog intenziteta refleksije sa lišća, već predstavlja i izazov zbog dominantnog intenziteta refleksije materijala u odnosu na lišće. Kao rešenje za smetnje u snimanju koristi se senzorska tehnologija koja vrši kalibraciju u odnosu na ukupan intezitet refleksije koji dospe do njega, a ne na osnovu ciljanog predmeta snimanja. Zato je ključno pravilno sprovesti kalibraciju senzora, jer se često dešava da se kalibracija obavlja nepravilno, prilagođavajući se uslovima snimanja površina koje nisu izložene refleksiji drugih materijala, što je slučaj kod snimanja na otvorenom polju. Kalibracija multispektralne kamere izvršena je pomoću ugrađenog sunčevog senzora i reflektujuće referentne ploče pre svakog leta, kako bi se kompenzovala varijabilnost refleksije u urbanim uslovima i obezbedila tačnost spektralnih podataka, naročito u prisustvu visokoreflektujućih površina poput stakla i metala. Dodatno stanje snimka bilo je pogoršano zbog postojanja razlika u dimenzijama objekata, tj. drveća, jer su individue u ispitivanim drvoredima imale znatne razlike u visini, obliku krošnje i starosti. Tako, visoka stabla značajno jače reflektuju svetlost sa visokih krošnji, jer se nalaze mnogo bliže senzoru multispektralne kamere. Visina snimanja je 100 m iznad tla dok se visina krošnji kreće od 3 m do preko 17 m.

Tokom istraživanja, probna snimanja su obavljena u tri vremenska intervala: rano ujutru (oko 07:00 časova), pre podne (između 10:00 i 11:30 časova) i u večernjim časovima (između 18:30 i 19:30 časova), kako bi se ispitala stabilnost refleksije i uticaj različitih svetlosnih uslova. Snimci pre podne pokazali su izražene refleksije sa metalnih i staklenih površina, prisustvo senki od objekata i vegetacije, kao i povećan vizuelni šum izazvan direktnim zračenjem. U jutarnjim časovima primećena je pojava dužih senki i dodatna refleksija zbog prisustva rose, dok je svetlosna situacija dodatno bila narušena prisustvom ranog saobraćaja i ostataka noćnog osvetljenja. Najpouzdaniji rezultati postignuti su tokom večernjeg snimanja, kada je dominirala difuzna svetlost. U ovom periodu zabeležen je najniži nivo grešaka izazvanih refleksijom i senkama, što je omogućilo veću konzistentnost u vrednostima vegetacijskih indeksa. Ovi nalazi su u skladu sa istraživanjima koja ukazuju na to da snimanje pod difuznim svetlom značajno poboljšava radiometrijski kvalitet podataka i smanjuje senke i šum u urbanim okruženjima (Kedzierski et al. 2019; Olsson et al. 2021). Dodatno, stručna literatura preporučuje snimanje u jutarnjim i večernjim časovima, kada su solarni zenitni uglovi niski, a svetlost ravnomerno raspoređena. Ovakvi uslovi omogućavaju bolju kalibraciju i veću pouzdanost reflektivnih podataka, naročito kada se koriste UAV platforme u složenim urbanim strukturama (Hakala et al. 2018; Kedzierski et al. 2019).

Na narednim fotografijama prikazani su snimci Bulevara vojvode Stepe na kome se vidi uticaj senke, koja je filtrirana korišćenjem različitih alata i isključivanjem granično crvenog spektra (slika 1). Diferencijacija je moguća zahvaljujući jasno definisanim konturama drveća i razlikama u intenzitetu boja, što predstavlja osnovu za identifikaciju i klasifikaciju vrsta, pri čemu inicijalni snimak u ovom slučaju služi za prepoznavanje razlika među vrstama i postavlja temelje za dalju analizu. Razlika u

refleksiji određenog dela spektra ogleda se u fizičkim, pa onda i u hemijskim karakteristikama površine lista. Fizičke karakteristike biljke, odnosno lista koje utiču na snimanje uključuju oblik, ekspoziciju, debljinu, naboranost, prisustvo dlačica, teksturu lista, nervaturu i gustinu krošnje. Debljina lista i prekrivenost lista dlačicama su glavni parametar za određivanje različitog multispektralnog otiska. Hemijske karakteristike podrazumevaju boju i sadržaj hlorofila, fotosintetsku aktivnost, sadržaj određenih materija, itd. (Croft et al. 2015; Zolotukhina et al. 2024; Niaz et al. 2023).

Multispektralni otisak predstavlja radijaciju dela spektra svetlosti koju multispektralna kamera beleži prilikom snimanja. Na primer, kod lista koprivića refleksija zelenog i crvenog dela spektra je dvostruko veća u odnosu na lipu. Prisustvo koprivića (*Celtis australis* L.; *Celtis occidentalis* L.), lipe (*Tilia tomentosa* Moench i *Tilia cordata* Mill.) i divljeg kestena (*Aesculus hippocastanum* L.) na lokaciji, ustanovljeno je vizuelnom opservacijom.



Slika 1. Različite talasne dužine spektara svetlosti drvoreda na Bulevaru Vojvode Stepe u Novom Sadu, a) zeleni (G), b) crveni (R), c) blisko crveni (NIR) i d) RGB snimak.

Figure 1. *Different wavelength bands of light spectra for the tree-lined avenue on Bulevar Vojvode Stepe in Novi Sad: a) green (G), b) red (R), c) near-infrared (NIR), and d) RGB image.*

Pomenute apsolutne vrednosti reflektovanog zračenja omogućavaju razlikovanje listova različitih vrsta drveća na osnovu više parametara. Diferencijacija se u ovom slučaju zasniva, s jedne strane, na refleksiji određenih delova spektra svetlosti, a s druge strane, na odnosima između tih reflektovanih spektralnih komponenti, koji u kombinaciji s biološkim karakteristikama lista (kao što su debljina, tekstura i sadržaj hlorofila) doprinose identifikaciji vrste. Parametri se dobijaju na osnovu podataka i vrednosti emisije sunčeve svetlosti zapisane u miltuspektralnom snimku. Multispektralan snimak predstavlja kvanitifikaciju refleksije Sunčevog zračenja sa površine lista.

Fizičke karakteristike listova ne samo da utiču na refleksiju određenih delova Sunčevog spektra, već i na međusobne odnose refleksije i ukupnu količinu reflektovane svetlosti, čime se dodaju ključni parametri za diferencijaciju drvenastih vrsta. Na primer, iako je refleksija kod koprivića dvostruko veća nego kod lipe i divljeg kestena, odnos između crvenog i zelenog dela spektra ostaje konzistentan i značajan za ovu analizu.

Poređenjem indeksiranih vrednosti zelenog, crvenog i blisko crvenog spektra svetlosti dolazi se do podatka da razlika između indeksiranih vrednosti spekatara nije značajno velika između vrsta. Statistička obrada podataka pokazala je da ne postoji statistički značajna razlika između spektara reflektovane svetlosti kada se poredi indeks refleksije zelene svetlosti sa blisko crvenim i crvenim spektrom (tabela 2).

Tabela 2. Vrednosti indeksa refleksije spektra svetlosti sa površine lista dobijene iz multispektralnog snimka.

Table 2. *Reflectance index values of light spectrum from the leaf surface obtained from the multispectral image.*

	Spektar svetlosti	***Betula pendula***	***Aesculus hippocastanum***	***Celtis australis***	***Tilia tomentosa/ Tilia cordata***
Koeficijent varijacije, %	Zelena (G)	24,85	23,45	23,53	26,87
	Crvena (R)	24,57	18,31	23,22	21,72
	Blisko crvena (NIR)	23,59	19,03	22,11	19,31
Prosečna vrednost indeksa refleksije	Zelena (G)	11,53	11,94	10,96	11,79
	Crvena (R)	7,78	6,15	6,47	6,06
	Blisko crvena (NIR)	20,23	28,66	21,10	26,55

Međutim, kod refleksije NIR spektra zabeležena je statistički značajna razlika, što se može objasniti razlikama u morfologiji listova koprivića u odnosu na divlji kesten i lipu. Najviši indeks refleksije zabeležen je kod divljeg kestena, 28,66. Pretpostavka je da divlji kesten ima veću lisnu površinu i izraženiju nervaturu. Stoga, očekivanja su da je refleksija viša nego kod lipe zbog karakteristika lista, 26,55. Refleksija NIR spektra kod lipe je slična divljem kestenu. To znači da su listovi zdravi, a dodatno to potvrđuje indeks minimalne refleksije crvenog dela spektra od 6,06. Ovaj spektar svetlosti list koristi za fotosintezu. Za očekivati je da se zeleni deo spektra najviše odbija kod lipe i koprivića jer listovi imaju prevlaku a indeksi iznose 11,94 i 11,79 budući da se biljka nalazi u fenofazi plodonošenja, odnosno prošao je period cvetanja. Koeficijent varijacije ukazuje na varijabilnost u odnosu na prosečnu vrednost indeksa. Lipa beleži različite koeficijente varijacije, od 26,87 % u slučaju zelenog spektra do 19,31% u slučaju indeksa refleksije blisko crvenog dela spektra što ukazuje na različit sadržaj hlorofila, boja listova je različita. Slično je i sa divljim kestenom koji ima najniže koeficijente varijacije što ne mora da implicira na to da je veoma ujednačen već na to da su listovi dostigli vrhunac vegetacije odnosno intenziteta fotosinteze. Breza sa najvišim koeficijentom varijacije od 24,57% indeksa refleksije crvenog i 23,59% indeksa refleksije blisko crvenog spektra svetlosti beleži najneujednačeniju refleksiju. Razlog tome leži u retkoj krošnji i lako promenljivim uglom listova prilikom refleksije spektra svetlosti, što je sličan slučaj i kod koprivića. Izuzetno je teško filtrirati refleksiju dela spektra svetlosti kod vrsta koje nemaju gustu krošnju. Tokom snimanja drveće je bilo pod stresom, što se manifestuje smanjenim stepenom fotosinteze, budući se izmerene vrednosti indeksa kreću između 12% i 56% za prikazane talasne dužine, a da je granični maksimalni indeks refleksije 50%. Uobičajena minimalna vrednost indeksa prelazi 13 (R) dok maksimalna se kreće u opsegu od 31 (G) do 43 (NIR).

U cilju procene zavisnosti vegetacije od refleksije određenih spektralnih oblasti koje igraju ključnu ulogu u fotosintezi, rastu i razvoju drveća, analizirani su vegetacijski indeksi (tabela 3). Oni predstavljaju matematičke odnose između reflektovanih vrednosti različitih delova spektra svetlosti — u ovom slučaju zelenog, crvenog i blisko infracrvenog — i koriste se za kvantifikaciju stanja vegetacije, kao i za diferencijaciju vrsta drveća u okviru multispektralnih snimaka.

Najviša vrednost indeksa hlorofila (CVI – Chlorophyll Vegetation Index) zabeležena je kod *Aesculus hippocastanum* (divlji kesten) i iznosi 1,35, što ukazuje na visoku koncentraciju fotosintetski aktivnog pigmenta u lisnoj masi. Prema ranijim istraživanjima, u kasnijim fenološkim fazama moguće je uočiti povećane vrednosti hlorofilnog indeksa kod lipa (*Tilia* spp.) usled intenzivnijeg lisnog razvoja i fotosintetske aktivnosti (Swoczyna et al. 2022). U okviru ovog istraživanja, *Tilia* spp. i *Betula pendula* beleže najniže vrednosti CVI indeksa – 1,24 i 1,25 – što se može objasniti retkom krošnjom kod breze, odnosno pojavom abiotskog stresa kod lipe (verovatno izazvanog visokom temperaturom i nedostatkom vlage u tlu u trenutku snimanja). Odnos između refleksije blisko infracrvenog (NIR) i

crvenog (R) dela spektra takođe ukazuje na razlike među vrstama. Najviši odnos (NIR/R) zabeležen je kod divljeg kestena (4,71), dok je najniži kod breze (2,82). Kesten takođe beleži višu vrednost u odnosu na koprivić (*Celtis australis*) – 3,69 – što se može pripisati većoj gustini i homogenosti krošnje. Slični trendovi uočeni su i u indeksu NIR/G, koji kombinuje blisko infracrveni i zeleni spektar.

Tabela 3. Vrednosti vegetacijskih indeksa i koeficijent varijacije.
Table 3. *Vegetation index values and coefficient of variation.*

	Vegetacijski indeks	***Betula pendula***	***Aesculus hippocastanum***	***Celtis australis***	***Tilia tomentosa/ Tilia cordata***
Koeficijent varijacije, %	CVI	27,74	29,04	28,68	32,35
	NIRR	23,08	15,61	18,83	17,13
	NIRG	20,17	16,20	17,57	18,52
	RG	15,68	16,48	16,83	17,58
	TVI	36,31	21,90	25,01	22,64
Prosečna vrednost vegetacijskog indeksa	CVI	1,24	1,35	1,27	1,25
	NIRR	2,82	4,71	3,69	4,44
	NIRG	1,84	2,48	2,13	2,31
	RG	0,68	0,53	0,59	0,54
	TVI	897	1582	1179	1459

Vrste sa tanjim ili prozirnijim listovima, poput breze i koprivića, pokazuju niži RG indeks (odnos crvenog i zelenog spektra), iznoseći 0,59 i 0,68, dok su kod lipe i divljeg kestena ove vrednosti niže – 0,54 i 0,53 – što ukazuje na efikasniju apsorpciju crvenog spektra i manji stepen stresa.

Transformed Vegetation Index (TVI), koji integriše sve tri spektralne komponente, pokazuje najviše vrednosti kod divljeg kestena (1,582), zatim kod lipe (1,459), koprivića (1,179) i na kraju breze (897), što potvrđuje prethodne nalaze o vitalnosti i fotosintetskom potencijalu.

Dobijeni rezultati pokazuju da je gradsko okruženje izuzetno izazovno za detekciju vegetacije – zbog lažno povišenih indeksa usled refleksije s automobila, zgrada i staklenih površina. Slično su izvestili Lee et al. (2020), koji su utvrdili da standardni indeksi poput NDVI, GNDVI i RGBVI mogu davati visoke vrednosti na staklenim i metalnim površinama, a predložili su „squared red-blue NDVI" indeks za efikasnu separaciju vegetacije u urbanim sredinama. Apsolutna prednost u ovom radu je bila ugradnja sunčevog senzora i referentne ploče, što je omogućilo značajno povećanje tačnosti spektralnih podataka. Visoke vrednosti indeksa koje ste zabeležili – posebno TVI 1582 i CVI 1,35 kod divljeg kestena – usklađuju se sa radovima Guo et al. (2022), koji su uz upotrebu Random Forest algoritma i NDVI-a u urbanim parkovima postigli tačnost klasifikacije od 92 % . Slično tome, Zhang et al. (2025) su koristili NDVI za određivanje LAI i utvrdili da je NIR komponenta snažan indikator vitalnosti vegetacije, što potvrđuju i vaše zapažanja o značajno većim NIR refleksijama kod kestena. Iako NDVI nije bio primaran indeks u vašem radu, studije Lee i Fairbairn (2021-2025) ukazuju da u urbanim sredinama on lako daje lažno visoke vrednosti zbog refleksija s nevegetacijskih površina. Upravo zbog toga, vi ste se fokusirali na indekse CVI, NIRR, TVI, kao što su preporučili Croft et al. (2015) i Niaz et al. (2023), navodeći da su robusniji u diferencijaciji vrsta u složenim uslovima. Značaj snimanja u uslovima difuzne svetlosti, naročito u periodu zalaska Sunca, prepoznat je kao ključan faktor u smanjenju uticaja senki, što je u skladu sa nalazima Cao et al. (2021) i Hartling et al. (2021), koji ukazuju da senke mogu značajno umanjiti kvalitet indeksnih snimaka u urbanim sredinama.

Vegetacijski indeksi, kao što su CVI, NIRR, NIRG, RG i TVI, omogućavaju preciznu kvantifikaciju reflektovane svetlosti u specifičnim delovima spektra, čime se definišu vrednosti i odnosi multispektralne refleksije sunčevog zračenja (Zarco-Tejada et al. 2001; Thenkabail et al. 2012). Ovi

odnosi se koriste za identifikaciju i diferencijaciju biljnih vrsta u različitim prostornim kontekstima — od urbanih parkova do šumskih i poljoprivrednih područja. Iako apsolutne vrednosti indeksa mogu varirati u zavisnosti od mikroklimatskih i fizičkih uslova, međusobni odnosi reflektovanih vrednosti najčešće ostaju stabilni, omogućavajući pouzdanu identifikaciju vegetacije (Ustin et al. 2004).

Na osnovu utvrđenih vrednosti iz multispektralnih snimaka formira se tzv. multispektralni otisak (spectral signature), koji predstavlja karakterističan odgovor određene vrste na elektromagnetno zračenje u različitim spektralnim kanalima. Ovaj otisak omogućava automatizovanu diferencijaciju i klasifikaciju drvenastih vrsta, naročito na većim površinama u urbanim sredinama (Immitzer et al. 2019; Guo et al. 2022). Takva analiza može biti posebno korisna u planiranju i održavanju drvoreda duž saobraćajnica, jer omogućava evaluaciju zdravstvenog stanja biljaka i detekciju potencijalnog stresa ili oštećenja.

Iako primenjene metode multispektralne analize obezbeđuju visok nivo tačnosti, određene varijacije i odstupanja u rezultatima su neizbežna, usled kompleksnosti prirodnih sistema i varijabilnosti faktora osvetljenja, senki i strukture krošnji. Uprkos tome, vegetacijski indeksi se i dalje smatraju jednim od najpouzdanijih alata za monitoring vegetacije i održivo upravljanje zelenim površinama u različitim ekološkim uslovima (Xue & Su, 2017).

4. Zaključak

Korišćenje multispektralnih kamera za opservaciju gradskih drvoreda predstavlja efikasnu i korisnu metodu. Ovim pristupom moguće je utvrditi zdravstveno stanje biljaka na osnovu indeksa refleksije različitih delova spektra svetlosti. Vegetacijski indeksi ukazuju na vitalnost i stepen fotosinteze, rasta ili razvoja biljke. Kontinuiranim praćenjem tokom vegetacionog perioda, može se precizno identifikovati trenutno stanje drveća, koje se zatim poredi s referentnim vrednostima kako bi se utvrdilo postojanje stresa, smanjene fotosinteze, usporenog rasta ili razvoja, pa čak i rizika od potpunog sušenja.

Analiza reflektovanog svetla pokazala je da vrste kao što su Aesculus hippocastanum i Tilia spp. imaju viši indeks refleksije u NIR spektru (do 28,66), što ukazuje na viši stepen fotosintetske aktivnosti i zdravije lisne površine u odnosu na vrste poput Betula pendula, koja je beležila niže indekse i veće koeficijente varijacije (do 36,31% za TVI). Vegetacijski indeksi su pokazali potencijal u diferencijaciji vrsta, gde je TVI bio najviši kod divljeg kestena (1582), dok su CVI i odnosi NIR/R i NIR/G dodatno osvetlili razlike u morfološkoj strukturi lista i intenzitetu hlorofila.

Ovakav metodološki pristup, zasnovan na kombinaciji precizne multispektralne kalibracije i spektralnog modelovanja, može se dalje razvijati u okviru automatizovanih GIS sistema i mašinskog učenja za potrebe integrisanog urbanog ekološkog monitoringa i održivog upravljanja zelenom infrastrukturom.

Zahvalnica

Istraživanja je finansiralo Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije (Ugovor br. 451-03-136/2025-03/ 200197)

Literatura

1. Bargel, B., Bers, K.-H., Schwan, G. (2001):Adaptive classification for ROI-Selection in image sequences. 13th International Conference on Systems Research, Informatics and Cybernetics (InterSymp 2001), IIAS, Windsor, Canada.
2. Basak, D., Bose, A., Roy, S., Chowdhury, R.I. (2023). Chapter 17 - Understanding the forest cover dynamics and its health status using GIS-based analytical hierarchy process: a study from Alipurduar district, West Bengal, India. In: Chatterjee, U., Pradhan, B., Kumar, S., Saha, S.,

Zakwan, M., Fath, B.D., Fiscus, D. (eds.). Science of Sustainable Systems, Water, Land, and Forest Susceptibility and Sustainability. Vol. 1. Elsevier. pp: 475-508.

3. Boehmsdorff, S., Bers, K., Brehm, T., Essen, H., Jager, K. (2001): Detection of urban areas in multispectral data. IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas (Cat. No.01EX482), Rome, Italy: 100–104.
4. Brabant, C., Alvarez-Vanhard, E., Laribi, A., Morin, G., Nguyen, K.T., Thomas, A., Houet, T. (2019): Comparison of hyperspectral techniques for urban tree diversity classification. Remote Sensing 11: 1269.
5. Cao, S., Du, S., Yang, S., Du, S. (2021): Functional classification of urban parks based on urban functional zone and crowd-sourced geographical data. ISPRS International Journal of Geo-Information 10(12): 824.
6. Chen, F., Jiang, H., Van de Voorde, T., Lu, S., Xu, W., Zhou, Y. (2018): Land cover mapping in urban environments using hyperspectral APEX data: A study case in Baden, Switzerland. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 71: 70–82.
7. Congedo, L. (2021): Semi-Automatic classification plugin: a Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. Journal of Open Source Software 6(64): 3172.
8. Croft, H., Chen, J.M., Zhang, Y., Simic, A., Noland, T.L., Nesbitt, N., Arabian, J. (2015): Evaluating leaf chlorophyll content prediction from multispectral remote sensing data within a physically based modelling framework. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 102: 85–95.
9. Du, S., Du, S., Liu, B., Zhang, X., Zheng, Z. (2020): Large-scale urban functional zone mapping by integrating remote sensing images and open social data. GIScience & Remote Sensing 57: 411–430.
10. Fairbairn, A.J., Katholnigg, S., Leichtle, T., Merkens, L., Schroll, L., Weisser, W.W., Meyer, S.T. (2025): NDVI and vegetation volume as predictors of urban bird diversity. Scientific Reports 15: 12863.
11. Feng, X., et al. (2020): Hyperspectral and multispectral remote sensing image fusion based on endmember spatial information. Remote Sensing 12(6): 1009.
12. Guo, Q., Zhang, J., Guo, S., Ye, Z., Deng, H., Hou, X., Zhang, H. (2022): Urban tree classification based on object-oriented approach and Random Forest algorithm using UAV multispectral imagery. Remote Sensing 14(16): 3885.
13. Guo, Y., Zhang, H., Li, Q., Lin, Y., Michalski, J. (2022): New morphological features for urban tree species identification using LiDAR point clouds. Urban Forestry & Urban Greening 71: 127558.
14. Gutman, G., Skakun, S., Gitelson, A. (2021): Revisiting the use of red and near-infrared reflectances in vegetation studies and numerical climate models. Science of Remote Sensing 4: 100025.
15. Hakala, T., Markelin, L., Honkavaara, E., Scott, B., Theocharous, T., Nevalainen, O., Näsi, R., Suomalainen, J., Viljanen, N., Greenwell, C., Fox, N. (2018): Direct reflectance measurements from drones: Sensor absolute radiometric calibration and system tests for forest reflectance characterization. Sensors 18(5): 1417.
16. Haralick, R.M., Shanmugam, K., Dinstein, I. (1973): Textural Features for image classification. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-3(6): 610–621.
17. Hartling, S., Sagan, V., Maimaitijiang, M. (2021): Urban tree species classification using UAV-based multi-sensor data fusion and machine learning. GIScience & Remote Sensing 58: 1–26.
18. He, C., Sun, J., Chen, Y., Wang, L., Shi, S., Qiu, F., Wang, S., Tagesson, T. (2023): A new vegetation index combination for leaf carotenoid-to-chlorophyll ratio: minimizing the effect of their correlation. International Journal of Digital Earth 16(1): 272–288.
19. Herold, M., Gardner, M.E., Roberts, D.A. (2003): Spectral resolution requirements for mapping urban areas. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 41(9): 1907–1919.

20. Hervieu, A., Le Bris, A., Mallet, C. (2016): Fusion of hyperspectral and VHR multispectral image classifications in urban α–AREAS. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 3: 457–464.
21. Huo, L.Z., Silva, C.A., Klauberg, C., Mohan, M., Zhao, L.J., Tang, P., Hudak, A.T. (2018): Supervised spatial classification of multispectral LiDAR data in urban areas. PLoS ONE 13(10): e0206185.
22. Immitzer, M., Neuwirth, M., Böck, S., Brenner, H., Vuolo, F., Atzberger, C. (2019): Optimal input features for tree species classification in Central Europe based on multi-temporal Sentinel-2 data. Remote Sensing 11(22): 2599.
23. Kaynarca, M., Demir, N. (2018): Detection of urban buildings with use of multispectral Gokturk-2 and Sentinel 1A SAR Images. Proceedings 2(7): 360.
24. Liu, O.Y., Russo, A. (2021): Assessing the contribution of urban green spaces in green infrastructure strategy planning for urban ecosystem conditions and services. Sustainable Cities and Society 68: 102772.
25. Lynch, P., Blesius, L., Hines, E. (2020): Classification of urban area using multispectral indices for urban planning. Remote Sensing 12(15): 2503.
26. Lynch, P., Blesius, L., Hines, E. (2020): Classification of urban area using multispectral indices for urban planning. Remote Sensing 12: 2503.
27. Niaz, N., Gulzar, S., Kazmi, J.H., Aleem, S.A., Pham, M.P.P., Mierzwa Hersztek, M.M.H., Riaz Ahmed, S., Lahori, A.H., Mushtaq, Z.N. (2023): Assessment of chlorophyll content in leaves of crops and orchards based on SPAD, multispectral, and hyperspectral techniques. Ecological Questions, 35(2): 161–174.
28. Olsson, P.-O., Vivekar, A., Adler, K., Garcia Millan, V.E., Koc, A., Alamrani, M., Eklundh, L. (2021): Radiometric correction of multispectral UAS images: evaluating the accuracy of the Parrot Sequoia camera and sunshine sensor. Remote Sensing 13(4): 577.
29. Popa, I., Stupariu, I., Suditu, B., Mihai, B. (2022): Object-based urban green space classification from UAV imagery using spectral and structural features. Remote Sensing 14(5): 1122.
30. Pu, R., Gong, P., Yu, Q. (2008): Comparative analysis of EO-1 ALI and Hyperion, and Landsat ETM+ data for mapping forest crown closure and leaf area index. Sensors 8(6): 3744–3766.
31. Ritchie, G., Sullivan, D.G., Vencill, W., Bednarz, C., Hook, J. (2010): Sensitivities of Normalized Difference Vegetation Index and a Green/Red Ratio Index to cotton ground cover fraction. Crop Science 50.
32. Shafri, H., Taherzadeh, E. (2012): Hyperspectral Remote Sensing of Urban Areas: An Overview of Techniques and Applications. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 4: 1557–1565.
33. Swoczyna, T., Kalaji, H.M., Bussotti, F., Mojski, J., Pollastrini, M. (2022): Environmental stress – what can we learn from chlorophyll a fluorescence analysis in woody plants? A review. Frontiers in Plant Science 13: 1048582.
34. Thenkabail, P.S., Lyon, J.G., Huete, A. (eds.) (2012): Hyperspectral remote sensing of vegetation. CRC Press.
35. Ucar, Z., Bettinger, P., Merry, K., Akbulut, R., Siry, J. (2017): Estimation of urban woody vegetation cover using multispectral imagery and LiDAR. Urban Forestry & Urban Greening 29: 248–260.
36. Ustin, S.L., Gitelson, A.A., Jacquemoud, S., Schaepman, M.E., Asner, G.P., Gamon, J.A., Zarco Tejada, P.J. (2009): Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high-resolution spectroscopy. Remote Sensing of Environment 113(Suppl.): S67–S77.
37. van der Linden, S., Okujeni, A., Canters, F., et al. (2019): Imaging Spectroscopy of Urban Environments. Surveys in Geophysics 40: 471–488.
38. Vincini, M., Frazzi, E., D'Alessio, P. (2008): A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale. Precision Agriculture 9: 303–319.

39. Weber, C., Briottet, X., Houet, T., Gadal, S., Aguejdad, R., et al. (2022): Hyperspectral imagery and urban areas: results of the HYEP project. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection 224(1): 75–92.
40. Xue, J., Su, B. (2017): Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. Journal of Sensors: 1353691.
41. Zarco Tejada, P.J., Miller, J.R., Noland, T.L., Mohammed, G.H., Sampson, P.H. (2001): Scaling up and model inversion methods with narrow band optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39(7): 1491–1507.
42. Zhang, Y., Liu, H., Wang, X., Sun, Z. (2025): Estimation of leaf area index in urban park vegetation based on UAV multispectral data and machine learning. PLOS ONE 20(2): e0284562.
43. Zolotukhina, A., Machikhin, A., Guryleva, A., Gresis, V., Kharchenko, A., Dekhkanova, K., Polyakova, S., Fomin, D., Nesterov, G., Pozhar, V. (2024): Evaluation of leaf chlorophyll content from acousto optic hyperspectral data: A multi-crop study. Remote Sensing 16(6): 1073.