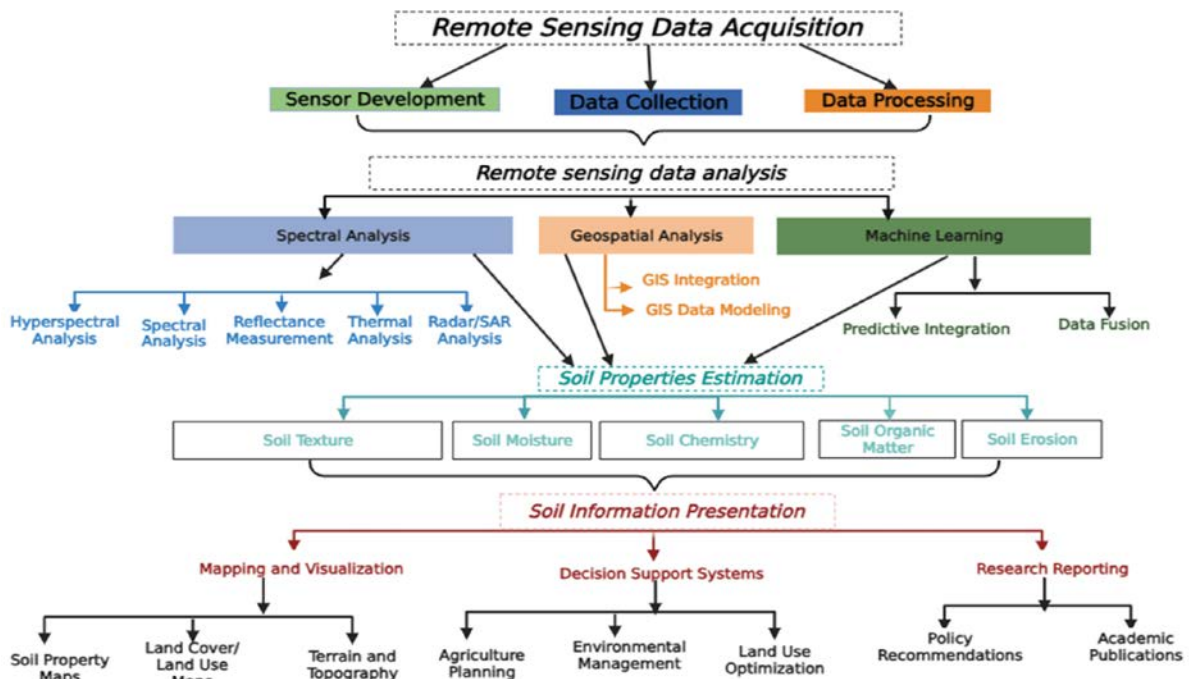


## Daljinska istraživanja tla

Daljinska istraživanja tla predstavljaju znanstvenu metodu koja koristi tehnologiju za prikupljanje informacija o svojstvima i stanju tla bez potrebe za izravnim kontaktom s terenom. Ova metoda postala je ključna u suvremenom razumijevanju i upravljanju tlom, posebno u kontekstu poljoprivrede, ekologije i zaštite okoliša.

Daljinska istraživanja (engl. *remote sensing*) definiraju se kao tehnike prikupljanja podataka o objektima ili područjima pomoću uređaja koji se ne nalaze u fizičkom kontaktu s promatranom površinom (Campbell i Wynne, 2011). Ovi podaci prikupljaju se putem različitih senzora smještenih na satelitima, zrakoplovima ili dronovima, a zatim se analiziraju kako bi se dobili podaci o svojstvima tla poput vlažnosti, sastava, strukture i vegetacijskog pokrova (Jones i Vaughan, 2010; Abdulraheem i sur., 2023) (Slika 1). Daljinska istraživanja temelje se na analizi reflektirane ili emitirane elektromagnetske energije s površine tla. Senzori prikupljaju podatke u različitim dijelovima elektromagnetskog spektra (npr. vidljivi, infracrveni, termalni), a svaka vrsta tla reflektira različite valne duljine, što omogućava identifikaciju i analizu (Lillesand i sur., 2015).



Slika 1. Shematski prikaz tehnika daljinskog istraživanja, analize podataka i primjene u praksi (izvor: Abdulraheem i sur., 2023).

### Kratka povijest i razvoj tehnologije daljinskih istraživanja tla

Prvi koraci u daljinskim istraživanjima datiraju još iz 19. stoljeća kada su za snimanje terena korišteni baloni i zmajevi opremljeni kamerama (Ryerson i sur., 1999). Međutim, značajan napredak u tehnologiji daljinskih istraživanja započinje tijekom 1960-ih godina s razvojem svemirskih programa. Lansiranjem prvih satelita, poput Landsata 1 1972. godine, omogućena je stalna i globalna primjena daljinskih istraživanja tla (Wulder i Franklin, 2003). Početkom 21. stoljeća, uvođenjem naprednih satelitskih sustava poput Sentinel-2 i hiperspektralnih senzora, kvaliteta i razlučivost podataka

značajno su se povećali (Drusch i sur., 2012). Razvoj bespilotnih letjelica (dronova) i njihove primjene u poljoprivredi i zaštiti okoliša omogućio je daljnji napredak u preciznosti i učinkovitosti daljinskih istraživanja tla (Zhang i Kovacs, 2012).

### Značaj daljinskih istraživanja tla

Daljinska istraživanja tla iznimno su važna zbog svoje sposobnosti pružanja prostorno i vremenski kontinuiranih podataka o velikim površinama u kratkom vremenu. Tradicionalne metode prikupljanja podataka o tlu, poput uzorkovanja i laboratorijskih analiza, često su skupe, dugotrajne i ograničene na mala područja (McBratney i sur., 2018). S druge strane, daljinska istraživanja omogućuju neinvazivnu, brzu i pristupačnu analizu tla na regionalnoj, nacionalnoj i globalnoj razini. Njihova važnost posebno dolazi do izražaja u kontekstu poljoprivrede gdje se koriste za optimizaciju navodnjavanja, gnojidbe i praćenje stanja usjeva (Pinter, Hatfield, i Moran, 2003). Također, daljinska istraživanja pomažu u praćenju degradacije tla, erozije, salinizacije i promjena u strukturi tla uzrokovanih klimatskim promjenama (Lobell i sur., 2003). Osim toga, tehnologije daljinskih istraživanja igraju ključnu ulogu u ekološkom praćenju i zaštiti okoliša, omogućujući znanstvenicima praćenje promjena u vegetacijskom pokrovu, identificiranje područja sklona eroziji te procjenu utjecaja različitih poljoprivrednih i urbanih aktivnosti na tlo (Asner, 2004). Daljinska istraživanja tla postaju sve važnija u kontekstu održivog upravljanja prirodnim resursima, što je posebno bitno u vremenu kada su degradacija tla, smanjenje plodnosti i klimatske promjene u porastu (Grunwald, 2009). Pružanjem točnih i pravovremenih informacija, daljinska istraživanja omogućuju donositeljima odluka, poljoprivrednicima i znanstvenicima bolje razumijevanje i upravljanje ovim ključnim resursom.

### Temeljni principi i tehnologije daljinskih istraživanja tla

Daljinska istraživanja koriste različite tehnologije i senzore za prikupljanje informacija o površini Zemlje, uključujući svojstva tla, vegetaciju i druge elemente okoliša. Ključna komponenta ovog procesa je razumijevanje elektromagnetskog spektra i upotreba naprednih senzora koji se nalaze na različitim platformama, kao što su sateliti, dronovi i zrakoplovi.

Elektromagnetski spektar je temeljni koncept daljinskih istraživanja. Sastoji se od valnih duljina elektromagnetskog zračenja koje uključuju vidljivu svjetlost, ultraljubičaste, infracrvene, mikrovalne i radio valove (Lillesand i sur., 2015). Kada elektromagnetsko zračenje interagira s površinom tla, ono se reflektira, apsorbira ili prenosi ovisno o svojstvima materijala.

Daljinski senzori detektiraju reflektirano i emitirano zračenje s tla te bilježe podatke u različitim dijelovima spektra. Na primjer, vegetacija ima visok odraz u bliskom infracrvenom dijelu spektra, dok voda reflektira više u vidljivom dijelu spektra, što omogućava razlikovanje ovih objekata (Jones i Vaughan, 2010). Analizom reflektivnih karakteristika, znanstvenici mogu identificirati razne značajke tla, kao što su tekstura, sadržaj vode i organske tvari (Campbell i Wynne, 2011).

Tehnologije daljinskih istraživanja uključuju nekoliko platformi koje omogućuju prikupljanje podataka s različitih visina i razlučivosti:

1. Sateliti su najčešće korištena platforma za daljinska istraživanja tla jer pružaju široko prostorno pokrivanje i omogućuju stalno praćenje velikih površina (Wulder i Franklin, 2003). Satelitski sustavi kao što su Landsat, Sentinel-2 i MODIS nude podatke s različitim razlučivostima i spektralnim rasponima, što omogućava analizu tla na globalnoj i regionalnoj razini (Drusch i

sur., 2012). Na primjer, Landsat pruža podatke s prostornom rezolucijom od 30 metara, dok Sentinel-2 pruža rezolucije od 10-60 metara, što omogućava detaljniju analizu (Giri, 2020).

2. Bepilotne letjelice su postale sve popularnije u daljinskim istraživanjima tla zbog svoje fleksibilnosti i mogućnosti prikupljanja podataka visoke razlučivosti (Zhang i Kovacs, 2012). Prednost bespilotnih letjelica je mogućnost letenja na niskim visinama, što omogućava detaljniju analizu manjih površina tla i preciznu procjenu stanja vegetacije i tla. Dronovi mogu nositi multispektralne, hiperspektralne, termalne i druge senzore, čime se povećava njihova svestranost (Hunt i sur., 2010).
3. Avionske platforme se koriste za prikupljanje podataka u područjima koja nisu lako dostupna ili gdje je potrebna visoka prostorna rezolucija (Jensen, 2007). Avionska istraživanja često koriste LIDAR (eng. *Light Detection and Ranging*) tehnologiju za prikupljanje točnih topografskih podataka o terenu, što omogućava detaljnu analizu strukture tla i vegetacije (Hodgson i Bresnahan, 2004).

### **Senzori**

Senzori su ključni instrumenti u daljinskim istraživanjima jer omogućuju prikupljanje podataka o refleksiji i emisiji elektromagnetskog zračenja s tla. Postoji nekoliko različitih vrsta senzora, od kojih svaki nudi različite mogućnosti analize:

1. **Multispektralni senzori.** Multispektralni senzori prikupljaju podatke u nekoliko širokih spektralnih kanala, obično između 3 i 15, koji obuhvaćaju različite dijelove elektromagnetskog spektra (Mather i Koch, 2011). Ovi senzori, poput onih na Landsat satelitima, koriste se za analizu vegetacijskog pokrova, vlage tla, saliniteta i drugih svojstava tla (Xue i Su, 2017). Multispektralni podaci su posebno korisni za prepoznavanje promjena u vegetaciji, otkrivanje erozije tla i procjenu vlažnosti.
2. **Hiperspektralni senzori.** Hiperspektralni senzori prikupljaju podatke u velikom broju uskih spektralnih kanala (od nekoliko stotina do nekoliko tisuća) koji pokrivaju široki raspon elektromagnetskog spektra (Govender i sur., 2007). Takva visoka spektralna razlučivost omogućava detaljnu identifikaciju i analizu kemijskih i fizičkih svojstava tla. Na primjer, hiperspektralni podaci mogu se koristiti za analizu sadržaja organske tvari u tlu, razine vlage i mineralnog sastava (Clark i sur., 2003).
3. **Termalni senzori.** Termalni senzori mjere toplinsko zračenje koje emitira površina tla (Gillespie, Rokugawa, i Matsunaga, 2018). Ti podaci omogućuju procjenu temperature tla, što može biti korisno za analizu vlage, evaporacije i prijenosa topline unutar tla (Price, 1980). Termalna daljinska istraživanja posebno su korisna u sušnim područjima gdje je vlažnost tla ključan čimbenik za upravljanje vodnim resursima.
4. **Radarski (eng. *radio detection and ranging*) senzori.** Radar koristi mikrovalno zračenje za prikupljanje podataka o površini tla (Ulaby, Moore, i Fung, 1986). Prednost radarskih senzora je što mogu prikupljati podatke bez obzira na vremenske uvjete i doba dana jer mikrovalni valovi mogu prodrijeti kroz oblake i raditi noću. Radar je posebno koristan za analizu strukture tla, procjenu vlažnosti i praćenje erozije tla (Dobson i sur., 1995). Radarski senzori poput onih na satelitima Sentinel-1 i RADARSAT pružaju podatke visoke rezolucije i korisni su za različite primjene u poljoprivredi i upravljanju okolišem.

Kombinacija različitih senzora i tehnologija omogućava prikupljanje sveobuhvatnih podataka o svojstvima tla, što daljinska istraživanja čini neprocjenjivim alatom za znanstvenike, poljoprivrednike i donositelje odluka.

### **Metode daljinskih istraživanja tla**

Daljinska istraživanja tla uključuju niz metoda i tehnologija za prikupljanje i analizu podataka o svojstvima tla. Ove metode koriste različite izvore podataka, uključujući optičko snimanje, radarsko snimanje i LIDAR, te se često kombiniraju s terenskim mjerenjima kako bi se dobila točna i pouzdana slika stanja tla. Prikupljanje podataka putem daljinskih istraživanja može se činiti pomoću različitih tehnologija, od kojih su najčešće optičko snimanje, radarsko snimanje i LIDAR. Svaka od ovih metoda ima svoje prednosti i ograničenja te se koristi u različitim primjenama ovisno o ciljevima istraživanja.

1. **Optičko snimanje.** Optičko snimanje koristi vidljivu, blisku infracrvenu i kratkovalnu infracrvenu energiju za prikupljanje podataka o površini tla (Lillesand i sur., 2015). Senzori smješteni na satelitima, zrakoplovima ili dronovima bilježe refleksiju sunčeve svjetlosti od tla, omogućujući analizu svojstava kao što su vlaga, struktura i pokrov tla (Jones i Vaughan, 2010). Optičko snimanje može pružiti visoku prostornu i spektralnu rezoluciju, ali je osjetljivo na vremenske uvjete, kao što su naoblaka i kiša, koji mogu otežati prikupljanje podataka (Wulder i Franklin, 2003).
2. **Radarsko snimanje.** Radarsko snimanje koristi mikrovalno zračenje za prikupljanje podataka o površini tla (Ulaby i sur., 1986). Mikrovalni senzori, poput onih na satelitima Sentinel-1 i RADARSAT, emitiraju signale koji se odbijaju od tla i vraćaju do senzora, omogućujući prikupljanje podataka bez obzira na vremenske uvjete ili doba dana (Henderson i Lewis, 1998). Radarsko snimanje posebno je korisno za analizu vlažnosti tla, strukture i erozije, budući da mikrovalno zračenje može prodrijeti kroz vegetaciju i tanki sloj tla (Dobson i sur., 1995).
3. **LIDAR.** LIDAR koristi laserske zrake za prikupljanje podataka o površini tla (Wehr i Lohr, 1999). Laserski senzori emitiraju impulse svjetlosti prema površini, a zatim mjere vrijeme potrebno da se svjetlost vrati do senzora. Ova metoda omogućava preciznu izradu 3D modela tla i topografije, što je korisno za analizu strukture tla, erozije i promjena u reljefu (Hodgson i Bresnahan, 2004). LIDAR se često koristi u kombinaciji s drugim metodama kako bi se dobila detaljna slika površine tla, posebno u područjima s gustom vegetacijom (Lefsky i sur., 2002).

Podaci prikupljeni putem daljinskih istraživanja tla analiziraju se korištenjem različitih pristupa kako bi se dobile informacije o svojstvima i stanju tla. Postoje tri glavna pristupa analizi podataka: spektralna analiza, prostorna analiza i modeliranje.

1. **Spektralna analiza** temelji se na proučavanju reflektivnih karakteristika tla u različitim dijelovima elektromagnetskog spektra (Goetz i sur., 1985). Svaki tip tla ima jedinstven spektralni potpis, koji omogućava identifikaciju različitih svojstava tla, poput sadržaja organske tvari, vlage i teksture (Clark i sur., 2003). Ovaj pristup je posebno koristan kod multispektralnih i hiperspektralnih podataka, gdje se može koristiti za klasifikaciju vrsta tla i detekciju promjena u pokrovu tla.
2. **Prostorna analiza** koristi geografske informacijske sustave (GIS) i tehnike prostorne statistike za analizu i vizualizaciju podataka o tlu (Burrough i sur., 2015). Korištenjem GIS-a, podaci

prikupljeni daljinskim istraživanjima mogu se kombinirati s drugim prostornim podacima, kao što su nadmorska visina, padalina i temperatura, kako bi se identificirali prostorni obrasci i odnosi između različitih svojstava tla (McBratney i sur., 2015). Ovaj pristup omogućava detaljnu analizu i kartiranje svojstava tla na velikim područjima.

3. **Modeliranje** podataka koristi matematičke modele za predviđanje i procjenu svojstava tla na temelju podataka prikupljenih putem daljinskih istraživanja (Grunwald, 2009). Modeli se mogu koristiti za procjenu vlažnosti tla, erozije, saliniteta i drugih ključnih karakteristika. Korištenjem modela strojnog učenja i statističkih metoda, podaci iz daljinskih istraživanja mogu se integrirati s terenskim mjerenjima kako bi se dobila točnija predviđanja i procjene (Minasny i McBratney, 2016).

### **Kombinacija daljinskih istraživanja s terenskim mjerenjima**

Iako su daljinska istraživanja vrlo moćna u prikupljanju velikih količina podataka o tlu, njihova se preciznost i pouzdanost često povećavaju kombiniranjem s terenskim mjerenjima. Ova kombinacija omogućava usporedbu i kalibraciju podataka prikupljenih daljinskim istraživanjima s izravnim mjerenjima na terenu (Carré i sur., 2007).

1. Terenska kalibracija uključuje usporedbu podataka prikupljenih daljinskim istraživanjima s uzorcima tla prikupljenim na terenu. To omogućava preciznije određivanje svojstava tla, poput sadržaja organske tvari, teksture i vlažnosti (Moran i sur., 1992).
2. Validacija je ključna komponenta kombinacije daljinskih istraživanja i terenskih mjerenja. Terenska mjerenja koriste se za provjeru točnosti i preciznosti podataka dobivenih daljinskim istraživanjima, čime se osigurava veća pouzdanost rezultata (Nocita i sur., 2015).
3. Kombinacija podataka prikupljenih daljinskim istraživanjima i terenskim mjerenjima te njihova integracija omogućava izradu sveobuhvatnih modela tla i preciznije karte svojstava tla (McBratney i sur., 2015). Ovakav pristup koristi se u poljoprivredi, zaštiti okoliša i planiranju korištenja zemljišta, omogućujući donositeljima odluka bolje upravljanje prirodnim resursima i tlom.

### **Primjena daljinskih istraživanja u poljoprivredi**

Daljinska istraživanja postala su ključna tehnologija u suvremenoj poljoprivredi, omogućujući poljoprivrednicima, znanstvenicima i donositeljima odluka praćenje stanje tla i usjeva na velikim površinama te donošenje informiranih odluka za povećanje produktivnosti i održivosti poljoprivrede. Primjene daljinskih istraživanja u poljoprivredi obuhvaćaju procjenu vlažnosti tla, praćenje plodnosti i strukture tla te praćenje usjeva i detekciju bolesti biljaka.

#### Procjena vlažnosti tla

Vlažnost tla je ključan parametar za upravljanje navodnjavanjem i optimizaciju prinosa u poljoprivredi. Daljinska istraživanja omogućuju procjenu vlažnosti tla na velikim površinama, pružajući pravovremene informacije o potrebama za vodom (Jackson i sur., 2004). Optički senzori mogu detektirati promjene u reflektivnim karakteristikama tla povezanim s razinom vlažnosti. Na primjer, infracrveni i bliski infracrveni dijelovi spektra osjetljivi su na sadržaj vode u tlu, a analizom ovih valnih duljina moguće je procijeniti vlažnost tla (Yang i sur., 2017). Landsat sateliti su često korišteni u procjeni

vlažnosti tla zbog njihove prostorne i spektralne rezolucije (Fensholt i Sandholt, 2003). Radarski senzori, poput onih na Sentinel-1 satelitima, koriste mikrovalno zračenje za procjenu vlažnosti tla (Ulaby i sur., 1982). Mikrovalni signali su osjetljivi na sadržaj vode u tlu i mogu penetrirati kroz vegetaciju, omogućujući prikupljanje podataka čak i u uvjetima visoke gustoće vegetacije ili oblačnog vremena (Tong i sur., 2020). Ovi podaci su od iznimne važnosti za praćenje vlažnosti tla u područjima koja su sklona sušama ili poplavama. Termalna daljinska istraživanja također se koriste za procjenu vlažnosti tla jer temperature površine tla variraju ovisno o sadržaju vode. Suho tlo se zagrijava brže i dostiže više temperature, dok mokro tlo zadržava toplinu (Zhao i sur., 2021). Ova metoda je korisna za identifikaciju područja s deficitom vlage i za prilagodbu navodnjavanja.

### Praćenje plodnosti i strukture tla

Plodnost i struktura tla ključni su faktori za uspjeh poljoprivredne proizvodnje, a daljinska istraživanja omogućuju procjenu tih svojstava na velikim površinama. Hiperspektralni senzori omogućuju detaljnu analizu kemijskih i fizikalnih svojstava tla, uključujući sadržaj organske tvari, minerala i teksturu tla (Ben-Dor i sur., 1999). Kroz analizu spektralnih potpisa tla moguće je identificirati područja s niskom plodnošću ili s problemima poput salinizacije (Kholdorov i sur., 2022). Kombinacija podataka dobivenih daljinskim istraživanjima s GIS alatima omogućava izradu detaljnih karata plodnosti i strukture tla (McBratney i sur., 2015). Na primjer, kombiniranjem podataka o reflektivnosti tla s informacijama o padalinama, topografiji i tipovima tla moguće je identificirati optimalne zone za određene poljoprivredne aktivnosti. Korištenjem podataka prikupljenih tijekom vremena, daljinska istraživanja omogućuju praćenje promjena u plodnosti tla uslijed erozije, ispiranja hranjivih tvari ili primjene gnojiva. Ovi podaci mogu pomoći poljoprivrednicima u prilagodbi praksi i optimizaciji primjene gnojiva (Nocita i sur., 2015).

### Praćenje usjeva i detekcija bolesti biljaka

Jedna od najvažnijih primjena daljinskih istraživanja u poljoprivredi je praćenje stanja usjeva i detekcija bolesti ili štetnika na poljoprivrednim kulturama. Vegetacijski indeksi, poput normaliziranog razlikovnog vegetacijskog indeksa (NDVI), koriste se za procjenu zdravlja i rasta biljaka (Rouse i sur., 1974). NDVI temeljen je na podacima iz crvenog i infracrvenog dijela spektra, a služi za procjenu količine i zdravlja vegetacije. Pomoću ovog indeksa moguće je pratiti razvoj usjeva, otkriti stres uzrokovan sušom, nedostatkom hranjivih tvari ili bolestima (Tucker, 1979). Hiperspektralni senzori mogu se koristiti za detekciju promjena u spektralnom odrazu biljaka uzrokovanih bolestima, prije nego što postanu vidljive golim okom (Mahlein i sur., 2013). Ovo omogućava ranu detekciju bolesti i štetnika, što poljoprivrednicima daje priliku za pravovremeno djelovanje i sprječavanje širenja bolesti. Upotreba dronova opremljenih multispektralnim, hiperspektralnim i termalnim kamerama postala je sve češća u poljoprivredi (Zhang i Kovacs, 2012). Dronovi omogućuju brzo i detaljno praćenje usjeva na razini polja, što omogućava preciznu identifikaciju područja pod stresom ili onih koja su pogođena bolestima ili štetnicima. Ova tehnologija omogućava poljoprivrednicima optimizaciju upotrebe pesticida i gnojiva, što smanjuje troškove i utjecaj na okoliš. Termalni senzori mogu detektirati promjene u temperaturi lista, što je često znak stresa uzrokovanog nedostatkom vode, bolesti ili štetnika (Costa i sur., 2013). Praćenjem temperaturnih promjena na listovima biljaka moguće je identificirati problematična područja unutar polja i poduzeti pravovremene mjere. Primjena daljinskih istraživanja u poljoprivredi

omogućava poljoprivrednicima učinkovitije upravljanje resursima, pravovremeno reagiranje na probleme i povećanje prinosa, što doprinosi održivoj poljoprivrednoj proizvodnji.

### **Uloga daljinskih istraživanja tla u zaštiti prirode i okoliša**

Daljinska istraživanja igraju ključnu ulogu u zaštiti okoliša jer omogućuju prikupljanje informacija o velikim i nepristupačnim područjima, olakšavajući praćenje promjena u okolišu. Primjena ovih metoda posebno je važna za praćenje erozije tla i degradacije, praćenje klimatskih promjena te identifikaciju kontaminiranih područja. Kroz ove primjene, daljinska istraživanja pomažu u donošenju odluka o održivom upravljanju okolišem i smanjenju negativnih utjecaja ljudskih aktivnosti.

Erozija tla i degradacija predstavljaju značajan ekološki problem, koji dovodi do smanjenja plodnosti tla, smanjenja poljoprivredne produktivnosti i degradacije staništa. Daljinska istraživanja pružaju mogućnost praćenja i procjene erozije tla na velikim površinama, što je posebno korisno u područjima koja su sklona eroziji uslijed vjetera, kiše ili ljudskih aktivnosti (Vrieling, 2006). Vegetacijski indeksi, poput normaliziranog razlikovnog vegetacijskog indeksa (NDVI), koriste se za praćenje vegetacijskog pokrova, što je ključan čimbenik u procjeni erozije tla (Rouse i sur., 1974). NDVI podaci dobiveni sa satelita poput Landsat i Sentinel-2 omogućuju procjenu stupnja erozije tla analizom promjena u vegetacijskom pokrovu tijekom vremena (Xiao i sur., 2002). LIDAR tehnologija koristi laserske zrake za prikupljanje podataka o topografiji terena, omogućujući preciznu analizu erozijskih procesa (Hodgson i Bresnahan, 2004). Korištenjem LIDAR-a moguće je pratiti promjene u reljefu tla, identifikaciju erozijskih jaraka i procjenu količine erodiranog materijala (Hodgson i Bresnahan, 2004). Radarske senzore, poput onih na Sentinel-1 satelitu, moguće je koristiti za procjenu vlažnosti tla, što je važan faktor u procjeni erozije (Ulaby i sur., 1986). Mikrovalna tehnologija omogućava prikupljanje podataka neovisno o vremenskim uvjetima i vegetacijskom pokrovu, što je čini učinkovitom za praćenje erozije u područjima s promjenjivom klimom.

Daljinska istraživanja igraju ključnu ulogu u praćenju klimatskih promjena, omogućujući prikupljanje podataka o različitim komponentama okoliša, uključujući temperaturu, vlažnost, vegetaciju, snježni pokrivač i vodene resurse (Running i sur., 2004). Ovi podaci su ključni za razumijevanje utjecaja klimatskih promjena na ekosustave i za razvoj strategija prilagodbe i ublažavanja. Promjene u vegetacijskom pokrovu jedan su od najvažnijih pokazatelja klimatskih promjena, a daljinska istraživanja pružaju informacije o globalnim promjenama u distribuciji i gustoći vegetacije (Pettoirelli i sur., 2005). Korištenjem satelitskih podataka, poput onih s MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), moguće je pratiti sezonske i godišnje promjene u vegetaciji te procijeniti utjecaj klimatskih promjena na biljnu pokrivenost (Zhao i Running, 2010). Daljinska istraživanja omogućuju praćenje promjena temperature tla i površine Zemlje putem termalnih senzora, što je važno za praćenje utjecaja klimatskih promjena na različite ekosustave (Wan i sur., 2002). Termalni podaci prikupljeni sa satelita poput Landsat i MODIS koriste se za analizu promjena temperature i procjenu utjecaja urbanizacije, deforestacije i drugih antropogenih aktivnosti na klimatske obrasce (Mildrexler i sur., 2011). Snježni pokrivač i vodeni resursi značajno su pogođeni klimatskim promjenama, a daljinska istraživanja omogućuju praćenje promjena u snježnim i ledenim površinama (Rees, 2005). Podaci prikupljeni putem satelita, kao što su Landsat, Sentinel i MODIS, koriste se za praćenje promjena u sezonskoj akumulaciji snijega, otapanju i utjecaju na dostupnost vode (Dozier, 2011).

Zagađenje tla i okoliša je sve ozbiljniji problem, a daljinska istraživanja igraju ključnu ulogu u identifikaciji i praćenju kontaminiranih područja, olakšavajući procjenu opsega i intenziteta zagađenja.

Hiperspektralni senzori omogućuju preciznu analizu kemijskih svojstava tla i detekciju prisutnosti teških metala, nafte i drugih zagađivača (Ben-Dor i sur., 1999). Spektralna analiza omogućava identifikaciju zagađenja na temelju jedinstvenih reflektivnih svojstava kontaminiranih područja. Na primjer, hiperspektralni podaci mogu otkriti prisutnost teških metala poput olova, kadmija ili žive u tlu (Gómez i sur., 2008). Multispektralni podaci prikupljeni pomoću satelita, poput Landsata, koriste se za detekciju izlivanja nafte na kopnu i moru (Hu i sur., 2009). Reflektivna svojstva nafte razlikuju se od okolnog tla ili vode, što omogućava preciznu identifikaciju zagađenja i praćenje njegovog širenja. Radarski senzori mogu detektirati promjene u površini tla i vode uzrokovane kontaminacijom, kao što su izlivanja nafte ili industrijski otpad (Mertes i sur., 1993). Radarske slike omogućuju praćenje kontaminiranih područja bez obzira na vremenske uvjete ili doba dana, čime se olakšava identifikacija zagađenja u različitim uvjetima. Daljinska istraživanja omogućuju brzu identifikaciju i praćenje zagađenih područja, što je ključno za provođenje mjera sanacije i sprječavanje širenja kontaminacije. Korištenjem ovih metoda, donositelji odluka i stručnjaci za okoliš mogu razviti učinkovitije strategije za zaštitu okoliša i upravljanje prirodnim resursima.

### **Izazovi i ograničenja**

Iako daljinska istraživanja tla predstavljaju moćan alat za praćenje i analizu okoliša, ova tehnologija suočava se s nizom izazova i ograničenja koja utječu na njezinu učinkovitost i primjenu. Neki od najznačajnijih izazova uključuju točnost i rezoluciju podataka, visoke troškove opreme i analiza te potrebu za stručnim znanjem i interdisciplinarnim pristupom.

Jedan od glavnih izazova u daljinskim istraživanjima je postizanje visoke točnosti i rezolucije podataka. Razlučivost senzora odnosi se na sposobnost detekcije finih detalja i razlikovanja malih objekata na površini tla. Postoje tri vrste razlučivosti koje utječu na kvalitetu podataka: prostorna, spektralna i vremenska razlučivost (Lillesand, Kiefer, i Chipman, 2015). Prostorna razlučivost određuje veličinu najmanjeg objekta koji senzor može razlikovati. Visokorazlučivi sateliti poput WorldView-3 imaju prostornu rezoluciju od 31 cm, dok sateliti poput Landsata imaju rezoluciju od nekoliko desetaka metara (Gorelick i sur., 2017). Dok visoka prostorna razlučivost omogućava detaljniju analizu, ona također stvara velike količine podataka, što može otežati obradu i analizu (Xue i Su, 2017). Spektralna razlučivost značajka je senzora, a odnosi se na sposobnost razlikovanja valne duljine elektromagnetskog zračenja. Hiperspektralni senzori, koji prikupljaju podatke u stotinama uskih spektralnih kanala, omogućuju preciznu identifikaciju svojstava tla (Govender i sur., 2007). Međutim, takva visoka spektralna rezolucija zahtijeva napredne tehnike obrade podataka, što može predstavljati izazov. Vremenska razlučivost odnosi se na učestalost snimanja istog područja tijekom određenog vremenskog razdoblja. Sateliti s visokom vremenskom razlučivošću, poput Sentinel-2 (5 dana), omogućuju učinkovito praćenje promjena u tlu kroz vrijeme (Drusch i sur., 2012). Međutim, naoblaka i nepovoljni vremenski uvjeti mogu ometati prikupljanje podataka, smanjujući točnost i pouzdanost analize (Schultz i Engman, 2012).

Još jedan značajan izazov u daljinskim istraživanjima tla su visoki troškovi opreme, prikupljanja podataka i analize. Sateliti, bespilotne letjelice i senzori koji se koriste za daljinska istraživanja zahtijevaju značajna financijska ulaganja. Na primjer, lansiranje i održavanje satelita mogu koštati stotine milijuna dolara, što ograničava pristup nekim zemljama i organizacijama (Asner i sur., 2010). Dronovi su povoljnija opcija za manja područja, ali i dalje zahtijevaju ulaganja u opremu, senzore i obuku operatera (Colomina i Molina, 2014). Analiza velikih skupova podataka prikupljenih daljinskim



istraživanjima zahtijeva napredne softverske alate i računalne resurse, što može biti skupo (Weng, 2012). Obrada hiperspektralnih podataka, na primjer, može zahtijevati visoko specijalizirane softverske pakete i stručnost u analizi podataka, što dodatno povećava troškove. Iako su neki satelitski podaci dostupni besplatno, mnogi visokorazlučivi podaci podliježu licencnim ograničenjima i mogu biti skupi za pristup (Gorelick i sur., 2017). Ograničenja u pristupu visokokvalitetnim podacima mogu predstavljati prepreku za znanstvenike, poljoprivrednike i donositelje odluka koji žele koristiti daljinska istraživanja u svojim projektima.

Primjena daljinskih istraživanja zahtijeva visok stupanj stručnosti i znanja u različitim disciplinama, uključujući geografiju, ekologiju, agronomiju, računalne znanosti i statistiku (Liu i sur., 2008). Potreba za interdisciplinarnim pristupom predstavlja izazov u osiguravanju dovoljno kvalificiranih stručnjaka i u razvoju integriranih metoda analize. Analiza podataka dobivenih daljinskim istraživanjima često uključuje napredne statističke metode, algoritme strojnog učenja i geografske informacijske sustave (GIS) (Foody i Atkinson, 2002). Korištenje ovih alata zahtijeva specifična znanja i vještine, što može ograničiti primjenu daljinskih istraživanja među korisnicima koji nemaju pristup stručnjacima u tom području. Učinkovita primjena daljinskih istraživanja u projektima zaštite okoliša, poljoprivredi i prostornom planiranju često zahtijeva suradnju stručnjaka iz različitih disciplina (Pettorelli i sur., 2014). Različite znanstvene pozadine i pristupi mogu otežati komunikaciju i integraciju podataka, što može usporiti donošenje odluka i primjenu rezultata u praksi. S obzirom na brzi razvoj tehnologije u području daljinskih istraživanja, stručnjaci moraju biti stalno informirani o novim tehnikama, alatima i metodama analize (Jones i Vaughan, 2010). Ova potreba za kontinuiranim obrazovanjem i usavršavanjem može biti izazovna i zahtijeva dodatna ulaganja vremena i resursa.

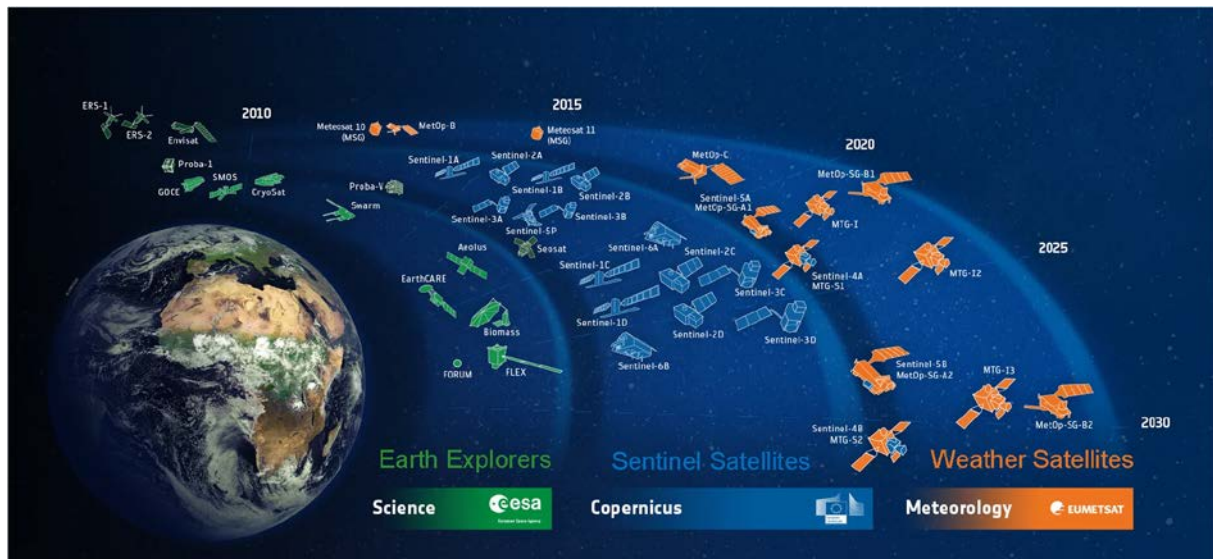
Zaključno, daljinska istraživanja tla suočavaju se s izazovima povezanim s točnošću i rezolucijom podataka, visokim troškovima opreme i analize te potrebom za stručnim znanjem i interdisciplinarnim pristupom. Unatoč tim izazovima, napredak u tehnologiji i metodologiji daljinskih istraživanja otvara nove mogućnosti za učinkovitiju analizu i zaštitu okoliša.

### **Budući razvoj daljinskih istraživanja tla**

Budući razvoj daljinskih istraživanja tla ogleda se u velikim potencijalnim mogućnostima kroz napredak u senzorskoj tehnologiji, primjenu umjetne inteligencije za analizu velikih skupova podataka te razvoj bespilotnih letjelica i satelitskih sustava. Ovi trendovi omogućit će precizniju, bržu i učinkovitiju analizu tla, što će doprinijeti boljim praksama u poljoprivredi, zaštiti okoliša i održivom upravljanju prirodnim resursima.

Jedan od ključnih čimbenika koji oblikuje budućnost daljinskih istraživanja tla je napredak u senzorskoj tehnologiji (Slika 2). Novi senzori postaju sve precizniji, brži i sposobniji za prikupljanje detaljnijih podataka o stanju tla. Hiperspektralni senzori nove generacije mogu prikupljati podatke u stotinama uskih spektralnih kanala, što omogućava detaljniju analizu svojstava tla (Govender i sur., 2007). Ova tehnologija precizniju identifikaciju minerala, organskih tvari, sadržaja vlage i drugih kemijskih svojstava tla (Ben-Dor i sur., 1999). Najnoviji hiperspektralni senzori, kao što je NASA-in satelit Hyperspectral Infrared Imager (HyspIRI), bit će posebno korisni za mapiranje tla na globalnoj razini (HyspIRI Mission Concept Team, 2018). Novi termalni senzori omogućit će preciznije mjerenje temperature tla, što je važno za analizu vlažnosti tla, evapotranspiracije i drugih fizičkih procesa (Gillespie i sur., 1999). Ova tehnologija će također pomoći u praćenju utjecaja klimatskih promjena na tla i u procjeni potreba za navodnjavanjem u poljoprivredi. Kombinacija različitih senzorskih

tehnologija, uključujući optičke, termalne, radarske i LIDAR senzore, omogućit će sveobuhvatniju analizu tla. Integracija podataka s više senzora omogućava precizniju procjenu svojstava tla i omogućava razvoj naprednih modela za različite primjene (Barbedo, 2022).



Slika 2. Program Europske svemirske agencije za promatranje Zemlje od 2010. do 2030. Razdoblje od 2020. do 2025. posebno je aktivno, s lansiranjem nekoliko znanstvenih demonstracijskih misija, velikog broja satelita programa Copernicus, operativnih misija promatranja Zemlje serije Sentinel te programa operative meteorologije kojim upravlja EUMETSAT, s nekoliko Sentinel misija u partnerstvu s ESA-om. (izvor: ESA)

Razvoj umjetne inteligencije (AI) i naprednih algoritama za analizu velikih skupova podataka otvorio je nove mogućnosti za primjenu daljinskih istraživanja tla. AI omogućava obradu i analizu ogromnih količina podataka prikupljenih sa satelita, dronova i drugih platformi, što olakšava otkrivanje uzoraka i trendova u podacima o tlu. Duboko učenje (engl. *deep learning*), podskup AI-a, pokazalo se izuzetno učinkovitim za klasifikaciju i analizu podataka prikupljenih daljinskim istraživanjima (Zhang i sur., 2018). Korištenjem neuronskih mreža, moguće je automatski prepoznati obrasce u spektralnim i prostornim podacima tla, omogućujući bržu i precizniju analizu. Prikupljanje velikih količina podataka iz različitih izvora predstavlja izazov u pogledu obrade i analize, ali AI omogućava korištenje metoda strojnog učenja za obradu velikih skupova podataka (Breiman, 2001). Na primjer, algoritmi kao što su *Random Forest* i *Gradient Boosting* mogu se koristiti za modeliranje svojstava tla, procjenu plodnosti i predviđanje erozijskih procesa (Grimm i sur., 2008). AI alati omogućuju automatizaciju procesa analize podataka, čime se značajno smanjuje vrijeme potrebno za obradu podataka (Ma i sur., 2019). Ova automatizacija omogućava brzu procjenu stanja tla na velikim područjima i olakšava donošenje odluka u poljoprivredi i zaštiti okoliša.

Bespilotne letjelice (dronovi) i satelitski sustavi nastavit će igrati ključnu ulogu u budućnosti daljinskih istraživanja tla, omogućujući prikupljanje podataka visoke rezolucije i fleksibilnost u primjeni. Bespilotne letjelice postaju sve sofisticiranije, s mogućnošću nošenja različitih vrsta senzora, uključujući multispektralne, hiperspektralne, termalne i LIDAR senzore (Zhang i Kovacs, 2012). Ova tehnologija omogućava prikupljanje podataka na razini polja, što je posebno korisno za preciznu poljoprivredu i praćenje stanja tla na lokalnoj razini. Dronovi s integriranim AI sustavima omogućit će automatsku analizu podataka u stvarnom vremenu, što će ubrzati proces donošenja odluka. Razvoj novih satelitskih sustava, poput satelita Sentinel-2, WorldView-3 i nadolazećih misija, omogućit će

prikupljanje podataka visoke rezolucije s poboljšanom spektralnom i prostornom razlučivošću (Giri, 2020). Ovi sateliti će omogućiti praćenje stanja tla na globalnoj razini s povećanom točnošću i učestalošću, što je od velike važnosti za praćenje promjena uzrokovanih klimatskim promjenama, urbanizacijom i poljoprivrednim praksama. Razvoj konstelacija malih satelita, poput satelita PlanetScope, omogućava učestalo praćenje velikih područja u visokoj rezoluciji (Zhang i sur., 2020). Ova tehnologija će omogućiti gotovo stalno praćenje stanja tla, što će biti od velike koristi za preciznu poljoprivredu i procjenu utjecaja različitih okolišnih čimbenika na tlo.

Budući napredak u senzorskoj tehnologiji, primjena umjetne inteligencije i razvoj bespilotnih letjelica i satelitskih sustava predstavljaju budućnost daljinskih istraživanja tla, omogućujući precizniju i učinkovitiju analizu tla na globalnoj razini. Ovi trendovi imaju potencijal unaprijediti poljoprivrednu praksu, zaštitu okoliša i održivo upravljanje resursima tla, čineći daljinska istraživanja još važnijim alatom u budućnosti.

#### Literatura:

1. Abdulraheem, M. I., Zhang, W., Li, S., Moshayedi, A. J., Farooque, A. A., Hu, J. (2023). Advancement of Remote sensing for soil Measurements and Applications: A Comprehensive review. *Sustainability*, 15(21), 15444. <https://doi.org/10.3390/su152115444>
2. Asner, G. P. (2004). Biophysical remote sensing signatures of arid and semiarid ecosystems. In *Remote Sensing for Natural Resource Management and Environmental Monitoring: Manual of Remote Sensing, Third Edition, Vol. 4*, 53-109.
3. Asner, G. P., Powell, G. V., Mascaró, J., Knapp, D. E., Clark, J. K., Jacobson, J., Kennedy-Bowdoin, T., Balaji, A., Paez-Acosta, G., Victoria, E., Secada, L., Valqui, M., Hughes, R. F. (2010). High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(38), 16738–16742. <https://doi.org/10.1073/pnas.1004875107>
4. Barbedo, J. G. A. (2022). Data fusion in agriculture: Resolving ambiguities and closing data gaps. *Sensors*, 22(6), 2285. <https://doi.org/10.3390/s22062285>
5. Ben-Dor, E., Irons, J. R., Epema, G. F. (1999). Soil reflectance. In A. N. Rencz (Ed.), *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing 3/3* (pp. 111-188)
6. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
7. Burrough, P. A., McDonnell, R. A., Lloyd, C. D. (2015). *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press, USA.
8. Campbell, J. B., Wynne, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing (5th ed.)*. The Guilford Press.
9. Carré, F., McBratney, A. B., Mayr, T., Montanarella, L. (2007). Digital soil assessments: Beyond DSM. *Geoderma*, 142(1-2), 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.08.015>
10. Clark, R. N., Swayze, G. A., Gallagher, A. J., King, T. V. V., Calvin, W. M. (2003). The U.S. Geological Survey, Digital Spectral Library splib05a. U.S. Geological Survey, Open File Report 03-395
11. Colomina, I., Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79-97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>

12. Costa, J. M., Grant, O. M., Chaves, M. M. (2013). Thermography to explore plant–environment interactions. *Journal of Experimental Botany*, 64(13), 3937-3949. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert029>
13. Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Pierce, L. E., Sharik, T. L., Bergen, K., Kellndorfer, J., ... Ranson, K. J. (1995). Estimation of forest biophysical characteristics in northern Michigan with SIR-C/X-SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(4), 877-895. <https://doi.org/10.1109/36.406674>
14. Dozier, J. (2011). Mountain hydrology, snow color, and the fourth paradigm. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 92(43), 373-374. <https://doi.org/10.1029/2011EO430001>
15. Drusch, M., Carrer, D., Gascon, F., i sur. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
16. Fensholt, R., Sandholt, I. (2003). Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near- and shortwave infrared data in a semiarid environment. *Remote Sensing of Environment*, 87(1), 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.07.002>
17. Foody, G. M., Atkinson, P. M. (2002). *Uncertainty in Remote Sensing and GIS*. John Wiley & Sons.
18. Gillespie, A. R., Rokugawa, S., Hook, S. J., Matsunaga, T., Kahle, A. B. (1999). Temperature/emissivity separation algorithm theoretical basis document. NASA Earth Observing System, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER).
19. Giri, C. P. (2020). *Remote sensing of land use and land cover: Principles and Applications*. CRC Press.
20. Goetz, A. F. H., Vane, G., Solomon, J. E., Rock, B. N. (1985). Imaging spectrometry for earth remote sensing. *Science*, 228(4704), 1147-1153. <https://doi.org/10.1126/science.228.4704.1147>
21. Gómez, C., Lagacherie, P., Coulouma, G. (2008). Continuum removal versus PLSR method for clay and calcium carbonate content estimation from laboratory and airborne hyperspectral measurements. *Geoderma*, 148(2), 141-148. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.09.016>
22. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
23. Govender, M., Chetty, K., Bulcock, H. (2007). A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies. *Water SA*, 33(2), 145-152. <https://doi.org/10.4314/wsa.v33i2.49049>
24. Grimm, R., Behrens, T., Märker, M., Elsenbeer, H. (2008). Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island—Digital soil mapping using Random Forests analysis. *Geoderma*, 146(1-2), 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.05.008>
25. Grunwald, S. (2009). Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modeling approaches. *Geoderma*, 152(3-4), 195-207. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.003>
26. Henderson, F. M., Lewis, A. J. (1998). *Principles and Applications of Imaging Radar*. Manual of Remote Sensing, 3rd edition, Volume 2. John Wiley i Sons.

27. Hodgson, M. E., Bresnahan, P. (2004). Accuracy of airborne LIDAR-derived elevation: Empirical assessment and error budget. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(3), 331-339. <https://doi.org/10.14358/PERS.70.3.331>
28. Hu, C., Li, X., Pichel, W. G., Muller-Karger, F. E. (2009). Detection of natural oil slicks in the NW Gulf of Mexico using MODIS imagery. *Geophysical Research Letters*, 36(1). <https://doi.org/10.1029/2008GL036119>
29. Hunt, E. R., Jr., Hively, W. D., McCarty, G. W., Lang, M. W., Sadeghi, A. M., Daughtry, C. S. T., ... Discovery, E. S. (2010). Remote sensing of crop leaf area index using unmanned airborne vehicles. *Agronomy Journal*, 102(6), 1654-1661.
30. HypSIRI Mission Concept Team (2018) HypSIRI Final Report. National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, Pasadena, California
31. Jackson, T.J., Chen, D., Cosh, M.H., Li, F., Anderson, M.C., Walthall, C., Doraiswamy, P., Hunt, E.R. (2004) Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. *Remote Sens. Environ.* 92: 475-482.
32. Jensen, J.R. (2007) *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. 2nd Edition, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River.
33. Jones, H. G., Vaughan, R. A. (2010). *Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications*. Oxford University Press.
34. Kholdorov, S., Gopakumar, L., Katsura, K., Jabbarov, Z., Jobborov, O., Shamsiddinov, T., Khakimov, A. (2022). Soil salinity assessment research using remote sensing techniques: a special focus on recent research. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1068(1), 012037. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1068/1/012037>
35. Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G., Harding, D. J. (2002). LIDAR remote sensing for ecosystem studies. *Bioscience*, 52(1), 19-30. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0019:LRSFES\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0019:LRSFES]2.0.CO;2)
36. Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., Chipman, J. W. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation* (7th ed.). Wiley.
37. Liu, Y., Gupta, H. V., Springer, E., Wagener, T. (2008). Linking science with environmental decision making: Experiences from an integrated modeling approach to supporting sustainable water resources management. *Environmental Modelling and Software*, 23(7), 846-858. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.10.007>
38. Lobell, D. B., Asner, G. P., Ortiz-Monasterio, J., Benning, T. L. (2003). Remote sensing of regional crop production in the Yaqui Valley, Mexico: estimates and uncertainties. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 94, 205-220. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00014-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00014-8)
39. Ma, L., Liu, Y., Zhang, X., Ye, Y., Yin, G., Johnson, B. A. (2019). Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 152, 166-177. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.015>
40. Mahlein, A.-K., Rumpf, T., Welke, P., Dehne, H.-W., Plümer, L., Steiner, U., Oerke, E.-C. (2013). Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases. *Remote Sensing of Environment*, 128, 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.019>
41. Mather, P. M., Koch, M. (2011). *Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction* (4th ed.). John Wiley & Sons.
42. McBratney, A. B., Minasny, B., Stockmann, U. (2018). *Pedometrics*. Springer.

43. Mertes, L. A., Smith, M. O., Adams, J. B. (1993). Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon River wetlands from Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 43(3), 281-301. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90071-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90071-5)
44. Mildrexler, D. J., Zhao, M., Running, S. W. (2011). A global comparison between station air temperatures and MODIS land surface temperatures reveals the cooling role of forests. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(G3). <https://doi.org/10.1029/2010JG001486>
45. Minasny, B., McBratney, A. (2016). Digital soil mapping: A brief history and some lessons. *Geoderma*, 264, 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017>
46. Moran, M., Jackson, R. D., Slater, P. N., Teillet, P. M. (1992). Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. *Remote Sensing of Environment*, 41(2–3), 169–184. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90076-v](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90076-v)
47. Nocita, M., Stevens, A., van Wesemael, B., Aitkenhead, M., Bachmann, M., Barthès, B., ... Wetterlind, J. (2015). Soil spectroscopy: An alternative to wet chemistry for soil monitoring. *Advances in Agronomy*, 132, 139-159. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.02.002>
48. Pettorelli, N., Safi, K., Turner, W. (2014). Satellite remote sensing, biodiversity research and conservation of the future. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1643), 20130190. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0190>
49. Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C. J., Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503-510. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
50. Pinter, P. J., Jr., Hatfield, J. L., Moran, M. S. i sur. (2003). Remote sensing for crop management. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(6), 647-664. <https://doi.org/10.14358/PERS.69.6.647>
51. Price, J. C. (1980). The potential of remotely sensed thermal infrared data to infer surface soil moisture and evaporation. *Water Resources Research*, 16(4), 787-795.
52. Rees, W. G. (2005). Remote sensing of snow and ice. <https://doi.org/10.1201/9781420023749>
53. Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium* (pp. 301-317). NASA SP-351.
54. Running, S. W., Nemani, R. R., Heinsch, F. A., Zhao, M., Reeves, M., Hashimoto, H. (2004). A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience*, 54(6), 547-560. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0547:ACSMOG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0547:ACSMOG]2.0.CO;2)
55. Ryerson, R. A., Henderson, F. M., Lewis, A. J. (1999). *Manual of Remote Sensing: Remote sensing for the earth sciences*.
56. Schultz, G. A., Engman, E. T. (2012). *Remote sensing in hydrology and water management*. Springer Science & Business Media.
57. Tong, C., Wang, H., Magagi, R., Goïta, K., Zhu, L., Yang, M., Deng, J. (2020). Soil moisture retrievals by combining passive microwave and optical data. *Remote Sensing*, 12(19), 3173. <https://doi.org/10.3390/rs12193173>
58. Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
59. Ulaby, F. T., Moore, R. K., Fung, A. K. (1982). *Microwave remote sensing: Active and passive. Volume 2-Radar remote sensing and surface scattering and emission theory*. Addison-Wesley.

60. Ulaby, F. T., Moore, R. K., Fung, A. K. (1986). *Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Volume 3-From Theory to Applications.* Artech House.
61. Vrieling, A. (2006). Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review. *Catena*, 65(1), 2-18. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.10.005>
62. Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Q., Li, Z.-L. (2002). Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 163-180. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00093-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00093-7)
63. Wehr, A., Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3), 68-82. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00011-8)
64. Weng, Q. (2012). Remote sensing of impervious surfaces in urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment*, 117, 34-49. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.030>
65. Wulder, M. A., Franklin, S. E. (2003). *Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and Case Studies.* Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0306-4>
66. Xiao, J., Shen, Y., Ge, J., Tateishi, R., Tang, C., Liang, Y., Huang, Z. (2002). Evaluating urban expansion and land use change in Shijiazhuang, China, by using GIS and remote sensing. *Landscape and Urban Planning*, 75(1-2), 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.12.005>
67. Xue, J., Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017, 1353691. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>
68. Yang, G., Liu, J., Zhao, C., Li, Z., Huang, Y., Yu, H., Zhang, X. (2017). Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: Current status and perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1111. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01111>
69. Zhang, C., Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693-712. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>
70. Zhang, C., Marzougui, A., Sankaran, S. (2020). High-resolution satellite imagery applications in crop phenotyping: An overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 105584. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105584>
71. Zhang, L., Zhang, L., Du, B. (2018). Deep learning for remote sensing data: A technical tutorial on state of the art. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 4(2), 22-40. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2016.2540798>
72. Zhao, M., Running, S. W. (2010). Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 329(5994), 940-943. <https://doi.org/10.1126/science.1192666>
73. Zhao, Z., Wang, H., Qin, D., Wang, C. (2021). Large-scale monitoring of soil moisture using Temperature Vegetation Quantitative Index (TVQI) and exponential filtering: A case study in Beijing. *Agricultural Water Management*, 252, 106896. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106896>

Dr. Sc. Tamara Đerđ,  
Dr. sc. Domagoj K. Hackenberger,  
Prof. dr. sc. Branimir K. Hackenberger