

Univerzita Karlova

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geografie

Studijní obor: Geografie a kartografie



Matěj Nechutný

**MAPOVÁNÍ KORÁLOVÝCH ÚTESŮ A MOŘSKÉ TRÁVY NA ATOLU GOIDHOO
S VYUŽITÍM UAV DAT**

CORAL REEFS AND SEAGRASS MAPPING ON GOIDHOO ATOLL USING UAV DATA

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Mgr. Lucie Červená, Ph.D.

Praha 2024

Prohlášení o autorství

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze 31. 7. 2024



Matěj Nechutný

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval Mgr. Lucii Červené, Ph.D. za čas věnovaný vedení mé bakalářské práce, za cenné rady, připomínky a náměty. Také děkuji firmě TRL Space, která umožnila pořízení dat, bez kterých by tato práce nebyla možná. V neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům za podporu nejen při psaní této práce, ale po celou dobu studia.

Abstrakt

Tato práce se zabývá dálkovým průzkumem korálových útesů a mořské trávy se zaměřením na hyperspektrální data z oblasti Malediv a jejich klasifikaci. První část se věnuje popisu korálových útesů a mořské trávy. Následně jsou popsány spektrální křivky prvků mořského dna a jejich charakteristiky. Zároveň jsou představeny faktory ovlivňující křivky. Dále je představena oblast Malediv a ostrovů Goidhoo a Fulhadhoo, u kterých probíhala analýza zkoumaných ekosystémů. V praktické části je nejdříve představen sběr a výběr dat. Jednotlivé klasifikace poté byly prováděny na třech oblastech (mořská tráva, korálový útes a korálová zahrádka). Před výslednými analýzami jsou popsány metody tvorby legendy s koncovými členy pro řízené klasifikace. Následně jsou porovnávány spektrální křivky jednotlivých klasifikací a tříd objevujících se na více územích. Pro analýzu klasifikací byl použit software ENVI a byly vybrány metody řízené klasifikace spectral angle mapper a spectral information divergence. Pro neřízené klasifikace byla použita metoda ISODATA. Každá klasifikace proběhla nad všemi zkoumanými lokalitami, pro něž byly vybrány vždy dvě linie. Řízené klasifikace měly vždy podobnější výsledek oproti neřízené klasifikaci. Zároveň mezi všemi metodami je vidět rozdílné určení některých tříd klasifikací.

Klíčová slova: Korálové útesy, mořská tráva, spektrální křivky, Spectral angle mapper, Spectral information divergence, ISODATA, Maledivy

Abstract

This thesis explores the remote sensing of coral reefs and seagrasses, focusing on hyperspectral data from the Maldives and their classification. The initial section provides a description of coral reefs and seagrasses, followed by an explanation of the spectral curves of seabed features and their characteristics. Factors influencing these curves are also discussed. Additionally, the Maldives, along with the islands of Goidhoo and Fulhadhoo where the analysis of the studied ecosystems was conducted are introduced.

In the practical section, the data collection and selection process is outlined, which included three areas (seagrass, coral reef, and coral garden) for classification. Prior to presenting the results, the methods for generating legends with endmembers for supervised classification are described. Subsequently, the spectral curves of the different classifications and classes appearing in multiple areas are compared. ENVI software was utilized for analyzing the classifications, employing spectral angle mapper and spectral information divergence methods for supervised classification, and the ISODATA method for unsupervised classification. Each classification was performed across all study sites, with two lines consistently selected for analysis. The supervised classifications consistently yielded more similar results compared to the unsupervised classifications. Nonetheless, differences in the determination of some classification classes are evident across all methods

Key words: Coral reef, seagrass, spectral curve, Spectral angle mapper, Spectral information divergence, ISODATA, Maldives

Obsah

Obsah.....	6
Seznam obrázků	8
Seznam tabulek.....	8
Seznam grafů.....	8
1 Úvod.....	9
2 Úvod do studia pobřežních oblastí pomocí DPZ.....	11
2.1 Korálové útesy	11
2.1.1 Vznik a vývoj korálových útesů	12
2.1.2 Ohrožení korálových útesů.....	13
2.1.3 Bělení korálových útesů	14
2.2 Mořské trávy	15
2.2.1 Rozšíření.....	16
2.2.2 Ohrožení	16
2.3 Spektrální vlastnosti mořského dna	17
2.3.1 Spektrální vlastnosti korálů	17
2.3.2 Spektrální rozlišení zdravých a poškozených korálů.....	20
2.3.3 Spektrální vlastnosti ostatních povrchů dna	20
2.4 Faktory ovlivňující zájmové ekosystémy.....	21
2.4.1 Morfologie pobřeží.....	21
2.4.2 Biofyzikální vlastnosti vody.....	22
3 Zájmové území	23
4 Metodika.....	25
4.1 Sběr a výběr dat	25
4.2 Výběr koncových členů	29
4.2.1 Legenda	29
4.2.2 Spektrální křivky tříd.....	30
4.3 Klasifikace	32
4.3.1 Řízená klasifikace (SAM a SID)	32
4.3.2 Neřízená klasifikace (ISODATA).....	32
5 Výsledky.....	36
5.1 Spektrální křivky.....	36
5.2 Klasifikace lokality mořské trávy	36
5.3 Klasifikace lokality korálového útesu.....	38
5.4 Klasifikace lokality korálové zahrádky.....	40
6 Diskuse	42
7 Závěr.....	44

8	Seznam použitých zdrojů	45
8.1	Odborná literatura	45
8.2	Internetové zdroje	49
9	Přílohy	50

Seznam obrázků

Obrázek 1: Průměrná odrazivost spekter prvků mořského dna (%).....	19
Obrázek 2: Mapa Malediv a zájmového území v administrativní oblasti South Maalhosmadulu	24
Obrázek 3: Lokalizace zájmového území mořské trávy u ostrova Goidhoo	28
Obrázek 4: Lokalizace zájmového území korálového útesu (vpravo) a korálové zahrádky (vlevo) u ostrova Fulhadhoo	28
Obrázek 5: Porovnání koncových členů linie F_Reef_line03_raw8912.....	29
Obrázek 6: Porovnání tříd linie korálové zahrádky.....	31
Obrázek 7: Porovnání metod řízené a neřízené klasifikace s RGB snímkem (linie mořské trávy).....	37
Obrázek 8: Porovnání metod řízené klasifikace (linie korálového útesu).....	39
Obrázek 9: Porovnání metod neřízené klasifikace s RGB snímkem (linie korálového útesu).....	40
Obrázek 10: Porovnání metod řízené a neřízené klasifikace s RGB snímkem (linie korálové zahrádky)	41

Pokud není u obrázku uveden zdroj, je obrázek dílem autora této práce.

Seznam tabulek

Tabulka 1: Lokality zájmových území	26
Tabulka 2: Korálová zahrádka.....	29
Tabulka 3: Korálový útes.....	29
Tabulka 4: Mořská tráva.....	29
Tabulka 5: Počet pixelů a procento zastoupení v klasifikaci pro linii F_Reef_line04_raw13328.....	38
Tabulka 6: Počet pixelů a procento zastoupení v klasifikaci pro linii F_Reef_line04_raw13328.....	39
Tabulka 7: Počet pixelů a procento zastoupení v klasifikaci pro linii CoralGarden_line02garden_raw7920.....	41

Seznam grafů

Graf 1: Nepřevzorkovaná data oříznuta na rozpětí 404,38 - 796,59 (linie: SeaGrass_South_v2_line02_raw10528).....	27
Graf 2: Převzorkovaná data na šířku pásma 11,206 nm (linie: SeaGrass_South_v2_line02_raw10528)	27
Graf 3: Spektrální křivky mořské trávy	34
Graf 4: Porovnání spektrálních křivek tříd korálů na jednotlivých lokalitách	34
Graf 5: Spektrální křivky třídy hluboká voda.....	35
Graf 6: Porovnání spektrálních křivek různých typů písčitého dna na jednotlivých lokalitách	35

1 Úvod

Korálové útesy a mořské trávy jsou zásadní pro udržení zdraví oceánských ekosystémů. Korálové útesy poskytují životní prostředí a útočiště pro široké spektrum mořských organismů, podporují a chrání pobřežní oblasti před erozí a jsou také zdrojem biologicky aktivních látek využitelných v medicíně. Mořské trávy plní klíčovou ekologickou funkci jako stanoviště pro mnoho druhů ryb a bezobratlých, přispívají ke zlepšení kvality vody tím, že zachycují sedimenty a živiny, a hrají významnou roli v ukládání uhlíku.

Dálkový průzkum poskytl zásadní technologie pro monitorování těchto ekosystémů, umožňující sledování biofyzikálních vlastností a souvisejících procesů na regionální i globální úrovni. Doplnil tak již dříve používaný monitoring z lodí. V poslední době při postupující změně klimatu je tak čím dál důležitější mít kvalitnější a dostupnější data z dálkového průzkumu pro mapování a monitoring ekosystémů (Goodman, Purkis, a Phinn 2013).

V posledních dvou desetiletích se možnosti dálkového průzkumu rychle rozšířily, a tak vývoj v této oblasti vede k lepší přesnosti a častějšímu mapování. Zároveň přinesl s sebou používání širší škály senzorů, ať už se jedná o multispektrální, hyperspektrální, radarové nebo akustické senzory (Kutser et al. 2020). Tato práce tak ukazuje pouze malé procento využitelnosti dálkového průzkumu u korálových útesů a mořské trávy.

V úvodní části jsou představeny a podrobně popsány zkoumané ekosystémy, včetně jejich spektrálních vlastností. Dále jsou identifikovány klíčové faktory, které tyto ekosystémy ovlivňují. Vzhledem k tomu, že se jedná o méně zkoumaná prostředí, byla této kapitole věnována značná pozornost, aby čtenářům poskytla komplexní přehled o možnostech a výzvách dálkového průzkumu Země zaměřeného na oceánské prostředí, zejména na korálové útesy a mořskou travu. Rovněž je představena zájmová oblast Malediv, odkud byla data získána.

V následující části jsou představeny konkrétní lokality a data, na nichž byly provedeny analýzy. Byla analyzována tři místa ze studované oblasti s příslušnými ekosystémy. Tato kapitola také obsahuje popis sběru dat. Legenda zde uvádí jednotlivé kategorie klasifikací, protože toto prostředí často obsahuje opticky a spektrálně podobné prvky, které je obtížné rozlišit. Na legendu je úzce navázán výběr koncových členů, podle kterých byly prováděny řízené klasifikace.

Spektrální křivky jsou analyzovány v následující kapitole, kde jsou prezentovány rozdíly ve spektrálním chování jednotlivých kategorií. Tyto rozdíly ovlivňují výsledky klasifikací pro každé zkoumané území. V diskusi jsou poté zhodnoceny výsledky těchto klasifikací.

2 Úvod do studia pobřežních oblastí pomocí DPZ

Pobřežní oblasti patří k důležitým ekosystémům s vysokou produktivitou organického materiálu a biologickou rozmanitostí, v rámci kterých se nachází mnoho typů stanovišť a biotopů. Pobřežní ekosystémy se podílejí na mnoha procesech důležitých v globálním měřítku, mezi které můžeme zařadit biologické, fyzikální a chemické vlivy na vodní sloupec, usazování sedimentů, ukládání živin a uhlíku, filtrace znečišťujících látek z vnitrozemských vod a ochrana pobřeží před erozí a bouřemi. Tyto ekosystémy ve velkém měřítku slouží také člověku jako centra rekreace a cestovního ruchu. V důsledku toho existuje potřeba přesných a efektivních metod pro monitorování těchto oblastí. Dálkový průzkum z družic, letadel a dronů může pomoci usnadnit monitorování a poskytnout požadované rozlišení s pravidelnou časovou frekvencí (Mishra a Gould 2016). Dálkový průzkum pobřežních vod se nevyužívá jen při studiu korálových útesů a mořské trávy, ale hraje klíčovou roli také ve sledování mangrovů (zdravotní stav (Vidhya et al. 2014) nebo při klasifikaci druhů (Kamal a Phinn 2011)), morfologii pobřeží nebo při sledování biofyzikálních vlastností vody. Dvě poslední jmenované ovlivňují též studované ekosystémy – korály a mořskou travu.

2.1 Korálové útesy

Korálové útesy jsou komplexními a vysoce rozmanitými mořskými ekosystémy, které jsou často přirovnávány k deštným pralesům. Skládají se především z útesotvorných korálů a představují strukturu odolnou vůči vlnám, která vzniká procesem cementace a stavbou kostry hermatypických korálů, vápnatých řas a dalších organismů, jež vylučují uhličitán vápenatý. Základními stavebními jednotkami korálového útesu jsou malé organismy známé jako polypy. Každý polyp je složen z žaludku, úst a chapadel, která slouží k obraně a k chytání potravy. Tento symbiotický vztah mezi polypy a jejich vápnatými sekrecemi je klíčový pro formování pevné korálové struktury, která je schopna odolat vlivům oceánského prostředí (NOAA 2013)

Korálové útesy jsou rozšířeny po celém světě v pásu o šířce přibližně 4 800 kilometrů, který je ohraničen obratníky Raka a Kozorooha (Pfleger Václav 1989). Většina korálů se vyskytuje na východních stranách kontinentů, což je důsledkem cirkulace mořských proudů, kdy ohřátá voda putuje od rovníků směrem k polům podél pobřeží. Na západních pobřežích převládají poté proudy studené. Tento geografický rozsah demonstruje globální distribuci korálových

útesů a jejich význam v kontextu světových mořských ekosystémů (Pfleger Václav 1989). Teplota vody by se měla držet mezi 16 a 36 °C (nejlépe 23 - 25 °C) (NOAA 2024), jinak začne docházet k vymírání korálů. Pro jejich výskyt jsou klíčové nejen teplotní podmínky, ale také hloubka vody, která obvykle nepřesahuje 30 metrů, ačkoli existují i výjimky. Dalším významným faktorem ovlivňujícím rozšíření korálů je sedimentace, kdy nadměrné ukládání sedimentů může vést k jejich zasypání a postupnému úpadku. Pro prosperitu korálů je rovněž zásadní salinita vody, která by ideálně měla oscilovat mezi 25 a 43 ‰, s optimální hodnotou kolem 35 ‰. Důsledky kolísání salinity vody lze pozorovat zejména v blízkosti ústí velkých řek, kde nízká salinita často omezuje výskyt korálů (UTS 2019).

2.1.1 Vznik a vývoj korálových útesů

Proces tvorby korálových útesů začíná, když se volně plavající korálové larvy, nazývané planule, usadí na pevném dnu v pobřežních oblastech. Tento usazený polyp začíná vylučovat kostru tvořenou uhličitanem vápenatým (CaCO_3) prostřednictvím své spodní části. Postupným množením nových polypů se korálové kolonie neustále rozšiřují, což vytváří charakteristické struktury korálových útesů (NOAA 2013).

Vývoj korálových útesů má tři fáze, podle kterých můžeme rozlišit i typ korálového útesu. Nejdříve se vyvine lemový korálový útes podél okraje pevniny ostrova nebo kontinentu. Útesy v tomto stádiu vyčnívají směrem k moři přímo ze břehu a tvoří hranice podél pobřeží a ostrovů. Jsou také nejběžnější formou korálových útesů. Když hladina vody nestoupá nebo pevnina u útesu neklesá, zastaví se vývoj korálového útesu v tomto stádiu (Trujillo a Thurman 2020).

Druhým stádiem vývoje korálových útesů jsou bariérové korálové útesy. Tento typ útesu se může vyskytovat souběžně s pobřežím nebo v kruhu okolo ostrova. Tyto útesy jsou od pevniny odděleny lagunou. Bariérový útes se vytvoří postupným klesáním pevniny a nárůstem korálového útesu směrem k hladině. Pokud by pevnina klesala příliš rychle a útes by nedorůstal dostatečnou rychlostí, korálový útes se postupně ponoří do příliš velké hloubky, kde by odumřel. K tomuto typu korálových útesů můžeme zařadit Velký bariérový útes, největší systém korálových útesů (Pfleger Václav 1989).

Třetím stádiem vývoje je atol. Vznik atolu je podmíněn pokračujícím poklesem sopečného ostrova a zároveň stálého růstu korálového útesu okolo. Ostrov po sobě při úplném poklesu

pod hladinu zanechá lagunu s hloubkou obvykle do 30 metrů. Na korálech okolo laguny postupně vítr s vlnami akumuluje písek až vznikne ostrov na kterém se později usadí suchozemské rostliny (Trujillo a Thurman 2020).

2.1.2 Ohrožení korálových útesů

Korálové útesy čelí dnes mnoha hrozbám, které ohrožují jejich přežití a stabilitu. Ohrožení, která mohou postihnout korály, můžeme rozdělit do různých skupin, buď dle původu hrozby na antropogenní nebo přírodní rizika, a nebo na ohrožení místní a globální podle velikosti rozsahu ohrožení (US EPA 2017). Při dlouhodobém vystavení korálů stresovým podmínkám dochází k jejich bělení (viz kapitola 2.3).

Mezi přírodní hrozby korálových útesů patří mechanické poškození způsobené extrémními povětrnostními jevy, jako jsou silné vlny hurikánů a cyklón. Tyto bouře mohou mít za následek rozbití vrcholů korálů a rozptýlení jejich fragmentů (NOAA 2013). Dlouhodobě nízké přílivy mohou také odhalit korály, přičemž rozsah poškození způsobeného jejich expozicí na vzduchu se mění v závislosti na denní době a povětrnostních podmínkách. Sluneční záření může způsobit přehřátí a vysušení tkání korálů, což představuje další riziko pro korály (NOAA 2013). Měkké vnitřní tkáně polypů mohou sloužit také jako potrava pro jiné živočichy, kdy při přemnožení predátorů mohou být zničeny i celé kolonie (Glynn, Manzello, a Enochs 2017).

Většina útesů se vyskytuje v mělkých vodách pobřežních oblastí. Důsledkem toho jsou tyto ekosystémy vystavovány pravidelnému stresu způsobenému lidskou činností. Korály jsou ovlivňovány přímou aktivitou člověka na korálových útesech, ale také nepřímými dopady z činnosti na souši v pobřežní zóně (US EPA 2017). K přímým poškozením můžeme zařadit těžbu korálů pro stavebnictví, destruktivní rybolov, sběr živých korálů pro akvaristiku nebo vojenskou aktivitu, která byla značná především v minulosti (Pfleger Václav 1989).

Nepřímé vlivy, které mohou způsobit poškození korálů, zahrnují škodlivé látky, které se dostávají do mořského prostředí z různých zdrojů. Zemědělská činnost je často spojována s nadměrným výskytem dusíku a fosforu, které se následně dostávají do moří. Odpadní vody, které nejsou dostatečně či vhodně upraveny, mohou obsahovat škodlivé patogeny, představující další riziko pro korály. Nesprávné nakládání s odpady vede k jejich úniku do

oceánů, což může poškodit korály v důsledku přítomnosti velkého množství odpadků a mikroplastů (US EPA 2017).

Dalším faktorem, který přispívá k degradaci korálových útesů, je sedimentace. Tento proces je způsoben především pobřežními stavebními aktivitami, ale také splachy sedimentů ze zemědělství a lesnictví. Tím dochází k poklesu kvality mořského prostředí a zhoršení podmínek pro růst a prosperitu korálových útesů (R. Rhodes a Naser 2021).

2.1.3 Bělení korálových útesů

Pokud jsou koráli dlouhodobě vystaveni stresovým podmínkám, i když nejsou mechanicky poškozeni, může dojít k narušení symbiotického vztahu mezi korály a zooxantelami. Tento proces vede k vypuzení zooxantel z tkání korálů a následnému bělení korálů (Trujillo a Thurman 2020). Je důležité poznamenat, že korálové útesy mají schopnost se zotavit z těchto poškození, pokud nejsou dlouhodobě vystaveny stresovým podmínkám a je jim poskytnut čas na regeneraci (Thurman, Trujillo 2005).

Většina korálů žije v mutualistickém vztahu s jednobuněčnými řasami zvanými zooxantely. Tyto řasy žijí v tkáních korálů, které jim poskytují prostředí a látky potřebné k fotosyntéze. Zooxantely naoplátku poskytují korálům produkty z fotosyntézy (glukóza, glycerol a aminokyseliny), které pokrývají většinu jejich energetických potřeb. Až 90 % organického materiálu je přenášeno mezi řasami a korály. Také pomáhají odstraňovat odpadní látky korálů (Shaver et al. 2020).

Další význam řas pro korály spočívá v jejich schopnosti odebírat oxid uhličitý z tkání korálů, čímž přispívají k procesu srážení uhličitánu vápenatého, což je klíčový mechanismus při tvorbě kostry korálů. Tímto způsobem řasy podporují udržení integrity a stability korálových struktur. Dále mají řasy rovněž vliv na zbarvení korálů. Jejich pigmenty a metabolické procesy mohou ovlivnit barevnou variabilitu korálů a přispět k jejich charakteristickému zbarvení (NOAA 2013). Protože se jedná o fotosyntetizující organismy, řasy vyžadují k životu přístup ke světlu a sluneční energii. Tato závislost omezuje hloubku, ve které mohou korály, které se na tyto řasy spoléhají, vytvářet útesy, na maximálně 30 metrů pod hladinou (Trujillo a Thurman 2020).

Bělení korálů představuje proces, při kterém dochází k odstranění zooxantel v důsledku vnějšího stresu. Tento stres může být způsoben zejména výkyvy teploty vody, ale může být ovlivněn také dalšími faktory, jako je znečištění prostředí, zvýšená intenzita ultrafialového

záření nebo náhlá změna salinity (Trujillo a Thurman 2020). Zvýšená teplota vody narušuje schopnost zooxantel zpracovávat světlo. Překročení určité tepelné hladiny způsobuje, že světlo dopadající na fotosyntetický aparát je příliš intenzivní, což vede k nadměrné produkci reaktivních forem kyslíku, jehož vysokou koncentraci nedokážou koráli tolerovat. To má za následek vypuzení zooxantel z tkání korálů a odhalení bezbarvých koster korálů. Vliv blednutí může být snížen, pokud se korál nachází v zastíněné oblasti a je vystaven menšímu slunečnímu záření (Shaver et al. 2020).

2.2 Mořské trávy

Mořské trávy představují jediné kvetoucí rostliny pod vodou a vyskytují se v mělkých vodách poblíž pobřeží na všech kontinentech světa s výjimkou polárních oblastí (Seagrass-Watch 2023). Tyto rostliny se vyvinuly z pozemních rostlin a adaptovaly se na život v mořském prostředí, což je také důvodem, proč více připomínají pozemní rostliny než řasy. Na rozdíl od řas tvoří mořské trávy květy, plody a semena a dokáží získávat živiny ze dna moře. Svou přítomností hrají významnou roli v mořských ekosystémech, poskytují útočiště pro mnoho druhů živočichů, snižují erozi, zlepšují kvalitu vody a slouží jako zdroj potravy pro ryby a další vodní organismy (Mark Stewar a Sarah Fairfull 2007). Mořské trávy jsou také organismy provádějící fotosyntézu a jsou někdy přirovnávány k „plícím moře“, jelikož dokáží každý den produkovat až 10 litrů kyslíku na metr čtvereční (Pamela L. Reynolds 2018).

Mořské trávy plní funkci přírodního filtru, kdy zachycují a váží sedimenty, což přispívá k čištění vody od suspendovaných látek. K čištění pomáhá složitá struktura kořenů a oddenků společně s epifyty, které rostou na stéblech mořské trávy. Zároveň mají výraznou protierozní funkci, jelikož zpevňují dno a snižují i sílu vln a proudů, čímž chrání pobřežní oblasti (Short, Short, a Novak 2016).

Význam mořských luk spočívá také v jejich schopnosti ukládat uhlík do tkání rostlin, což je zprostředkováno absorpcí oxidu uhličitého z vody. Tento proces má za následek odstraňování uhlíku z vody, čímž sehrává klíčovou roli v globálním koloběhu uhlíku a regulaci klimatu. Mořské trávy obecně vykazují nižší emise skleníkových plynů, jako jsou metan (CH₄) a oxid dusný (NO), ve srovnání s jinými pobřežními ekosystémy a mokřady (Unsworth et al. 2022).

2.2.1 Rozšíření

V současné době je identifikováno 72 druhů mořských trav, jejichž rozšíření je ovlivňováno řadou faktorů. Hlavní podmínkou pro růst trav je dostatek světla, díky kterému jsou schopny fotosyntézy, proto je rozšíření ovlivněno pouze na malou hloubku (1 – 3 m) v pobřežních vodách, ale existují i výjimky, kdy byly nalezeny mořské trávy i v hloubce přes 50 m (Pamela L. Reynolds 2018). Dostatek světla je ovlivněn také čistotou vody, přičemž je důležité, aby nebránila průniku sluneční energie k rostlinám. Zásadní je také pro mořské louky nevystavovat se působení tepla a vysychání, zejména při odlivu (Seagrass-Watch 2023).

2.2.2 Ohrožení

Mořské louky se v současné době potýkají s řadou hrozeb, které mohou způsobit jejich rapidní úbytek, nebo dokonce úplné vymizení na mnoha místech. Tyto hrozby mohou mít několik různých podob a zdrojů.

Mezi hlavní hrozby patří eutrofizace vody, která je způsobena splachem živin z pobřežních oblastí do moře. Přítomnost vyššího množství živin ve vodě vede k rozsáhlejšímu růstu řas, což následně brání pronikání světla k rostlinám a tím se zabraňuje fotosyntéze a dalšímu růstu. Podobný efekt nastává také kvůli zvýšenému zákalu vody, který může být způsoben zejména lidskou činností, jako je například lodní doprava (Pamela L. Reynolds 2018).

Dalším důležitým faktorem pro rozšíření trav v oceánech je teplota vody. Rostliny v jednotlivých podnebných pásmech jsou zvyklé na jiné rozpětí teplot, kdy trávy v mírném pásmu jsou omezeny horní hranicí teploty 25 °C. Oproti tomu v tropických oblastech jsou trávy na tyto teploty zvyklé (Short, Short, a Novak 2016).

Velkým rizikem je také mechanické poškození. To může vzniknout na základě přírodních vlivů ať už působením vln, bouří a nebo poškozením od živočichů, ale také ničením ovlivněným lidským faktorem jako např. rybolovem nebo lodní dopravou (Unsworth et al. 2019), případně turismem jako na Maledivách, kde některé resorty mořskou travu aktivně odstraňují.

2.3 Spektrální vlastnosti mořského dna

Spektrální vlastnosti jsou důležitým zdrojem informací o zemském pokryvu a umožňují posuzovat i jeho vlastnosti a stejně tak to funguje i pro mořské ekosystémy, takže na jejich základě lze odlišit jednotlivé typy mořského dna jako mořská tráva, písek, řasy a koráli, ale zároveň i jejich stav, např. identifikovat blednutí korálů (E. Hochberg 2003; E. J. Hochberg a Atkinson 2000). Vzhledem k útlumu světla ve vodním sloupci se zvyšující se hloubkou a výrazné absorpci vlnových délek nad 700 nm vodou se pro mapování dna používají pouze vlnové délky ve viditelné oblasti spektra. Infračervené pásmo je využíváno pro identifikaci pobřežních oblastí a vystupující vegetace (Yamano 2013). Spektrální křivky jsou primárně měřeny pomocí spektrometru přímo na místě (Eric J. Hochberg et al., 2004) nebo v laboratorních podmínkách (Teague et al., 2022). Dalšími metodami pro získání dat a mapování organismů jsou letecká měření (Asner et al., 2020), použití dronů (Parsons et al., 2018) či družicové snímkování (Kutser, Miller a Jupp, 2006).

2.3.1 Spektrální vlastnosti korálů

Obecně lze konstatovat, že všechny koráli vykazují velmi podobné spektrální vlastnosti, které se vyznačují sníženou odrazivostí v rozmezí 400 až 550 nm a následnými lokálními maximy při vlnových délkách 575, 600 a 650 nm (Eric J. Hochberg et al., 2004; Ray Chaudhury et al., 2020; Kobryn et al., 2013; Nurdin et al., 2016). V okolí vlnových délek 670–675 nm koráli vykazují charakteristický znak absorpce chlorofylu, po kterém následuje nárůst odrazivosti v blízkém infračerveném pásmu, což je způsobeno pigmentem zooxantel na povrchu korálů obsahujících chlorofyl (E. J. Hochberg a Atkinson, 2000; Ray Chaudhury et al., 2020). Kromě zooxantanel ovlivňují spektrální vlastnosti také pigmenty v ektodermálních a entodermálních tkáních a v kostře některých druhů korálů (Hedley a Mumby, 2002).

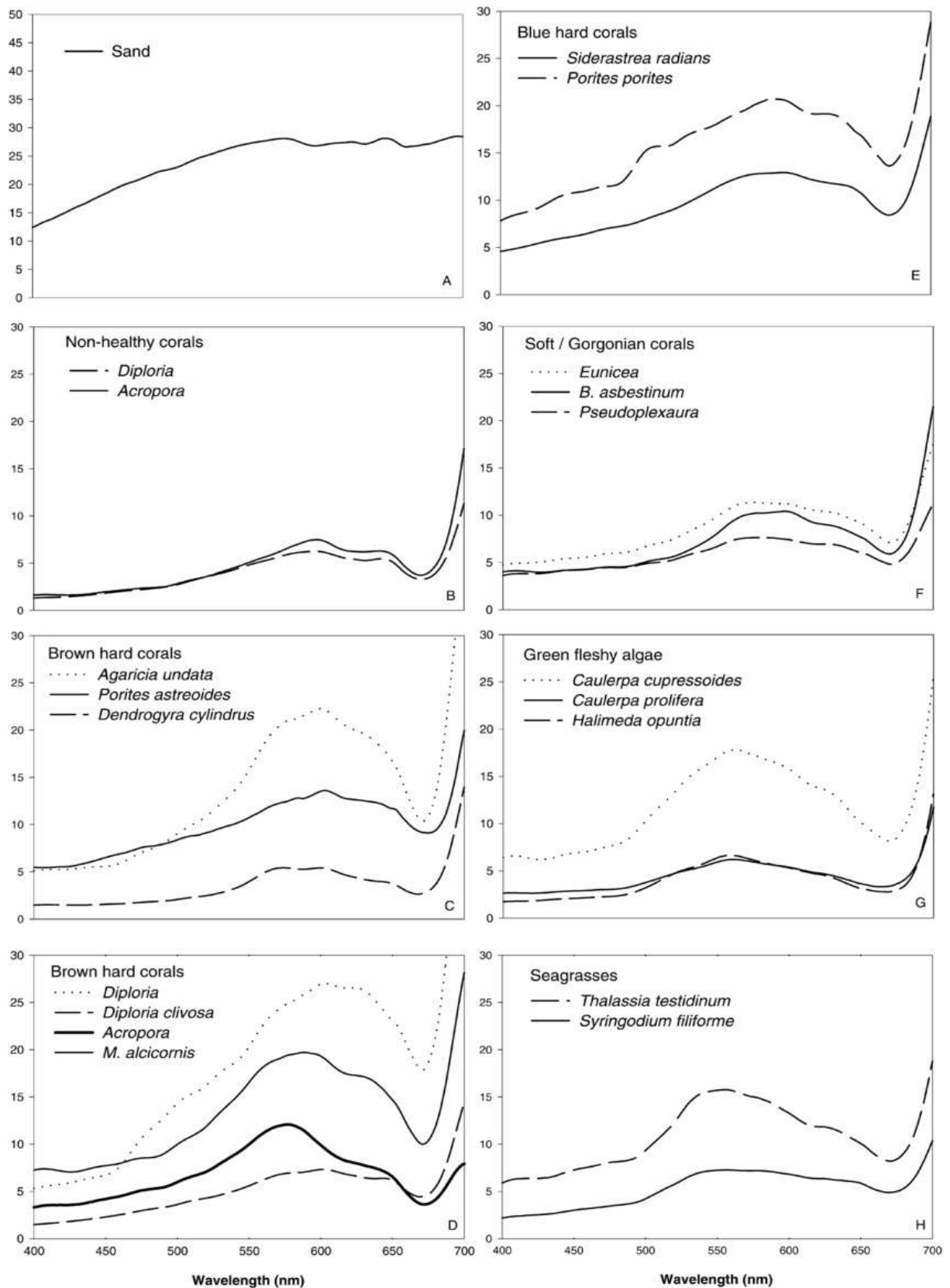
Dle (Eric J. Hochberg et al. 2004) lze rozlišit dva hlavní typy spektrálních křivek, které byly identifikovány na základě barev jednotlivých korálů. Koráli, které vizuálně vypadali jako hnědé, červené, oranžové, žluté nebo zelené, byly označeny jako „hnědé koráli“ (obr. 1 – C, D). Tyto koráli vykazovaly sníženou odrazivost mezi 400 a 550 nm a trojitý vrchol v lokálních maximech při 575, 600 a 650 nm. Naopak koráli, které vizuálně vypadaly fialově, modře, růžově nebo šedě, byly definovány jako „modré koráli“ (obr. 1 – E). Tyto koráli se vyznačovaly absencí lokálního maxima při 575 nm a určitou stagnací mezi 600 a 650 nm, po

kteře odrazivost klesá. Tento režim je způsoben nefluoreskující expresí hostitelského pigmentu (pocilloporinu). (Nurdin et al. 2016) rovněž zkoumali spektrální odlišitelnost korálů na základě jejich barev a rozdělili živé koráli do čtyř skupin podle vizuálního rozlišení na hnědé, zelené, světle zelené a fialové. Derivační analýza následně ukázala, že je možné tyto barevně odlišné koráli spektrálně oddělit.

Rozdíly v chování korálů v rámci taxonomické různorodosti jsou minimální, stejně jako rozdíly v odrazivosti v rámci geografické variability. To je způsobeno přítomností pigmentů v zooxantelách, které jsou konzervativní a nejsou závislé na druhu ani místě růstu korálů (Eric J. Hochberg et al., 2004).

K dalším faktorům, které mohou ovlivnit spektrální vlastnosti korálů, patří jejich morfologie. Koráli mohou mít různé růstové formy v závislosti na druhu, světelných podmínkách a proudění vody (Hedley a Mumby, 2002). Odlišná odrazivost na základě tvaru je dána jejich strukturou a zastíněním; například stolní koráli mají vyšší odrazivost než koráli rozvětvené (Kobryn et al., 2013). Jas podkladového substrátu může rovněž hrát významnou roli ve výsledné spektrální křivce pro různé morfologie korálů (Holden a LeDrew, 1998). Proto při měření in situ nemá tvar korálu významný vliv na spektrální křivky, avšak spektrální odlišnosti mezi jednotlivými koráli se projevují při měření dálkovými metodami (Hedley a Mumby, 2002).

Vliv na spektrální charakteristiku korálů má také fluorescence, která se projevuje na vlnových délkách 486, 515, 575 a 685 nm. Fluorescenci může být způsobena chlorofylem, biliproteinem, fykoerytrinem, ale je potřeba dalšího zkoumání, aby se zjistili přesné příčiny fluorescence (E. J. Hochberg a Atkinson 2000; Mazel 1997; Oswald et al. 2007).



Obrázek 1: Průměrná odrazivost spekter prvků mořského dna (%) písku (A), nezdravého korálu (B), hnědých tvrdých korálů (C, D), modrých tvrdých korálů (E), měkkého korálu (F), zelených řas (G) a mořské trávy (H) zdroj: (Karpouzli, Malthus a Place, 2004)

2.3.2 Spektrální rozlišení zdravých a poškozených korálů

Oproti taxonomické variabilitě je patrný rozdíl mezi koráli v rámci stádia jejich zdraví. Vybělené koráli mají vyšší odrazivost než zdravé koráli, avšak tvar spektrální křivky zůstává velmi podobný, přičemž rozdíl je především ve velikosti odrazivosti (Ray Chaudhury et al., 2020). Podobnost tvaru křivek je způsobena zbytky pigmentu v kostře korálů. Vybělené koráli mohou být občas zaměňovány s karbonátovými písky (E. Hochberg, 2003). Zeng et al. (2022) zjistili, že vybělené koráli mají maximum odrazivosti také v oblasti 570 nm, stejně jako zdravé koráli, což znamená, že tato charakteristika není ovlivněna blednutím. Clark et al. (2000) pozorovali rozdíly mezi živými, nedávno odumřelými koráli a koráli mrtvými více než 6 měsíců. Živé a nedávno odumřelé koráli měly velmi podobnou spektrální křivku, zatímco mrtvé koráli starší více než 6 měsíců vykazovaly tvarově podobné křivky, ale odrazivost byla přibližně dvakrát větší. Mrtvý korál je rychle kolonizován řasami, které obsahují také fotosyntetizující pigment, což může vést k záměně mezi živými koráli a mrtvými koráli kolonizovanými řasami (Holden a LeDrew, 1998). Nurdin et al. (2016) na základě derivační analýzy potvrdili, že ačkoli jsou si spektrálně podobní, živé koráli a mrtvé koráli pokryté řasami lze od sebe odlišit.

2.3.3 Spektrální vlastnosti ostatních povrchů dna

Největší spektrální odrazivost a zároveň nejmenší variabilitu tvaru křivky oproti ostatním bentickým organismům vykazují sedimenty a písek (obr. 1 – A), dosahující průměrné odrazivosti přes 30 % (E. J. Hochberg a Atkinson, 2000). Všechny zdravé fotosyntetizující organismy (koráli, mořské řasy a mořská tráva) vykazovaly nejmenší odrazivost při 670 nm, což značí přítomnost chlorofylu. Mikrořasy se mohou také vyskytovat v sedimentech, což může vést k poklesu odrazivosti při 670 nm. Mořská tráva (obr. 1 – H) a zelené řasy (obr. 1 – G) mají podobnou spektrální odezvu, s nižší odrazivostí na vlnových délkách 400–500 nm, a následným nárůstem. Rozdíl nastává v maximech, kdy mořská tráva dosahuje lokálního vrcholu odrazivosti při 550–555 nm, zatímco řasy dosahují maxima na vyšších vlnových délkách. Hnědé a červené řasy vykazují růst odrazivosti již při vlnových délkách 435–490 nm oproti zeleným řasám (E. Hochberg, 2003; Zeng et al., 2022; Karpouzli, Malthus a Place, 2004).

2.4 Faktory ovlivňující zájmové ekosystémy

2.4.1 Morfologie pobřeží

Topografické a hydrografické informace představují základní prvky při studiu pobřežní geomorfologie, sedimentárních procesů a hloubky vody. Tyto informace jsou nezbytné pro plánování úprav pobřeží, jako je výstavba přístavů nebo větrných elektráren, zavádění účinných opatření proti erozi a navrhování vhodných opatření na ochranu pobřežních ekosystémů. Pro tento účel jsou nutné údaje o dlouhodobých a krátkodobých změnách podél pobřeží, jelikož se jedná o velmi dynamické prostředí (Klemas 2013). K určení rozhraní mezi vodou a pevninou se používá několik indikátorů, mezi hlavní patří určení hranice vysoké vody (Jun Chang et al. 2005), vegetační linie (Daramola et al. 2022) nebo hranice útesů (Kumar, Narayana, a Jayappa 2010).

Rozvoj dálkového průzkumu Země a zlepšování technologií přinesly nové možnosti pro mapování hloubky dna. Batymetrie je tradičně měřena pomocí ultrazvukového sonaru, který poskytuje přesná měření, avšak nevýhodou jsou vysoké provozní náklady a nepoužitelnost v mělkých vodách. Na rozdíl od těchto metod nemá batymetrie pomocí dálkového průzkumu Země tato omezení, a proto je využívána v pobřežních oblastech a mělkých vodách. Tyto metody však nejsou vhodné pro mapování větších hloubek, jelikož signál je zde výrazně zeslaben. Dalšími faktory, které snižují přesnost měření pomocí dálkového průzkumu Země, jsou zákal, rozpuštěné organické látky a fytoplankton, proto se tyto metody nejčastěji využívají v prostředích s průhlednou vodou, jako je například okolí korálových útesů (Kutser et al. 2020; Gao 2009).

K mapování hloubky dna je možné využít několik přístupů, které se liší zejména druhem použitého senzoru. V hloubkách do 25 m lze využít optické senzory dálkového průzkumu Země (multispektrální a hyperspektrální data) doplněné o údaje z pozemního testování (např. koeficient útlumu světla nebo albedo dna). Ačkoli tyto metody nejsou tak přesné, mohou být užitečné ve špatně dostupných oblastech pro letadla nebo lodě, protože informace jsou získávány pomocí družic (Stumpf, Holderied, a Sinclair 2003; Philpot 1989; Yamano 2013).

Lidarové snímače mohou za ideálních podmínek produkovat přesné výsledky až do hloubek okolo 70 m. Pro oblasti do 100 km² a hloubky menší než 50 m je lidarová batymetrie efektivnější než použití akustických průzkumů. Výhodou lidarové technologie je schopnost pokrýt dno vysokou hustotou vzorkovacích bodů, což je vhodné v prostředích s vysokou

proměnlivostí, jako jsou korálové útesy. Pro přesné mapování je tato technologie využívána mnohem častěji než optické senzory (Purkis a Brock 2013).

2.4.2 Biofyzikální vlastnosti vody

Dálkový průzkum Země představuje vhodný nástroj pro zjišťování biofyzikálních vlastností pobřežních vod, které hrají klíčovou roli v globálním ekosystému a mají přímý dopad na ekologii těchto oblastí. Ve velkých oblastech oceánských a pobřežních vod je využití metod dálkového průzkumu Země nákladově efektivnější než tradiční metody, jako je používání lodí a bójí, ale ke správnému odhadu jsou též důležité informace sebrané v terénu. K získávání informací o stavu vody se využívá celé spektrum elektromagnetických vln. Viditelné spektrum je zejména využíváno k určování koncentrací chlorofylu a produktivity vody. Na rozdíl od volného oceánu jsou oblasti v okolí ústí řek a místa s vzestupnými proudy bohaté na primární produkci oceánů a významně přispívají k uhlíkovému cyklu. S primární produktivitou a počtem rozpuštěných látek ve vodě souvisí i barva vody, která odráží změnu složek ve vodním sloupci (Jones et al. 2014; Lee et al. 2015).

K zásadním biofyzikálním vlastnostem mořské vody patří také její povrchová teplota a salinita. Teplota vody je klíčová pro sledování zdraví korálů a pro studium stanovišť mořských živočichů, což umožňují dlouhé a přesné časové řady a jejich analýza. K prvotnímu studiu povrchové teploty vody se využívaly tepelné infračervené senzory, k nimž se později přidaly snímače pracující s mikrovlnným zářením. Pro získání přesných údajů o teplotě vody je zásadní provést atmosférickou korekci, která na měření významně působí (Heron, Heron, a Pichel 2013; Minnett et al. 2019).

Salinita vody je zásadní faktor pro určení globální vodní bilance, protože společně s povrchovou teplotou určuje hustotu vody, což má vliv na vertikální proudění oceánské vody. Salinita také slouží k odhadu rychlosti proudů a míry odpařování, a může být indikátorem zdrojů sladké vody. Senzory, které získávají informace o salinitě, využívají krátkovlnné mikrovlnné záření (Miller a Goodberlet 2004; Dinnat et al. 2019).

K dalším biofyzikálním vlastnostem vody, které můžeme měřit pomocí dálkového průzkumu země můžeme zařadit acidifikaci oceánů (Sun, Tang, a Wang 2012), pohyb a výšku vln (Isern-Fontanet et al. 2017) nebo sledování úniku látek na otevřené moře jako jsou například ropné skvrny (Fingas a Brown 2017).

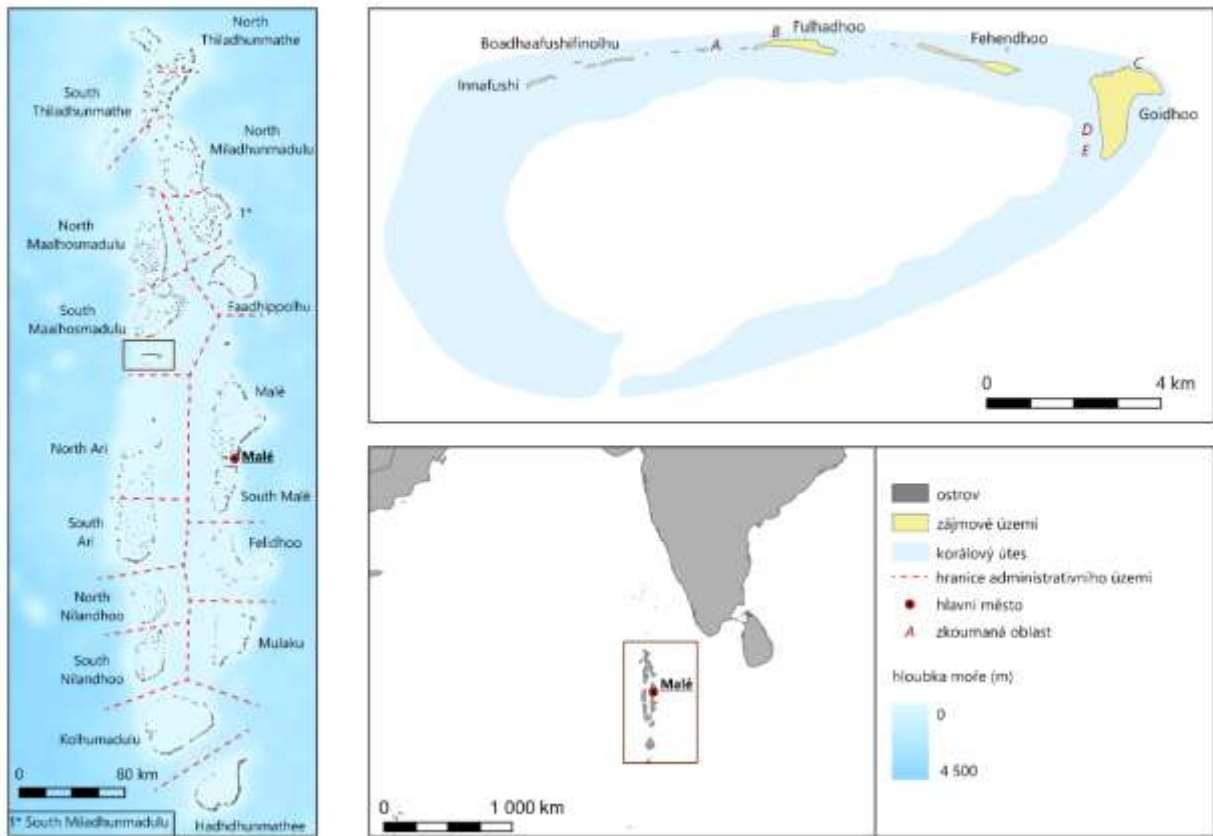
3 Zájmové území

Maledivy se rozkládají na 25 atolech s přibližně 1 200 ostrovy, které se nacházejí mezi 7° severní šířky a 0,5° jižní šířky v centrální části Indického oceánu (obr. 2). Celková rozloha území činí přibližně 90 000 km², avšak pevnina pokrývá pouze velmi malou část, konkrétně 298 km². Největším ostrovem je LA Gan s rozlohou přibližně 6 km², a patří mezi 190 obydlených ostrovů. Většina ostrovů je neobydlená, ale často využívána pro zemědělství nebo průmyslové účely. Přes 200 ostrovů slouží výhradně jako turistické resorty. Maledivy zahrnují sedmý nejrozsáhlejší systém korálových útesů na světě, s celkem 2 041 útesy, které pokrývají plochu 3 783 km² (Godfrey 2018).

Administrativně jsou Maledivy rozděleny do 21 regionů. Hlavním městem a administrativním centrem je Malé s více než 150 000 obyvateli, rozkládající se na třech hlavních ostrovech (Malé, Hulhumalé a Villingili) (Godfrey 2018).

Maledivy se nacházejí v tropické oblasti blízko rovníku, kde se teploty vzduchu celoročně pohybují mezi 25–32 °C. Nejteplejšími měsíci jsou březen a duben, zatímco prosinec patří k nejchladnějším. Srážky jsou ovlivněny dvěma monzunovými periodami: jihozápadním monzunem od května do listopadu (období dešťů) a severovýchodním monzunem od ledna do března (období sucha) (Maldives Meteorological Service 2024).

Zkoumaná oblast této bakalářské práce se nachází v blízkosti ostrovů Fulhadhoo (4°53'4" s. š. a 72°56'12,52" v. d.) a Goidhoo (4°52'24,72" s. š. a 72°59'51,7" v. d.), které jsou součástí administrativní oblasti Jižní Maalhosmadulu, často označované jako Baa. Lokality u ostrova Goidhoo (C, D, E) jsou lokality s růstem mořské trávy, zatímco v místech u ostrova Fulhadhoo (A, B) se nacházejí korálové útesy.



Obrázek 2: Mapa Malediv a zájmového území v administrativní oblasti South Maalhosmadulu: A – Coral garden, B – Coral reef, C – Pipeline, D – Seagrass north, E – Seagrass south; zdroj: (Rasheed et al. 2021; Maldives Land and Survey Authority 2021; World bank 2020), tvorba vlastní

4 Metodika

4.1 Sběr a výběr dat

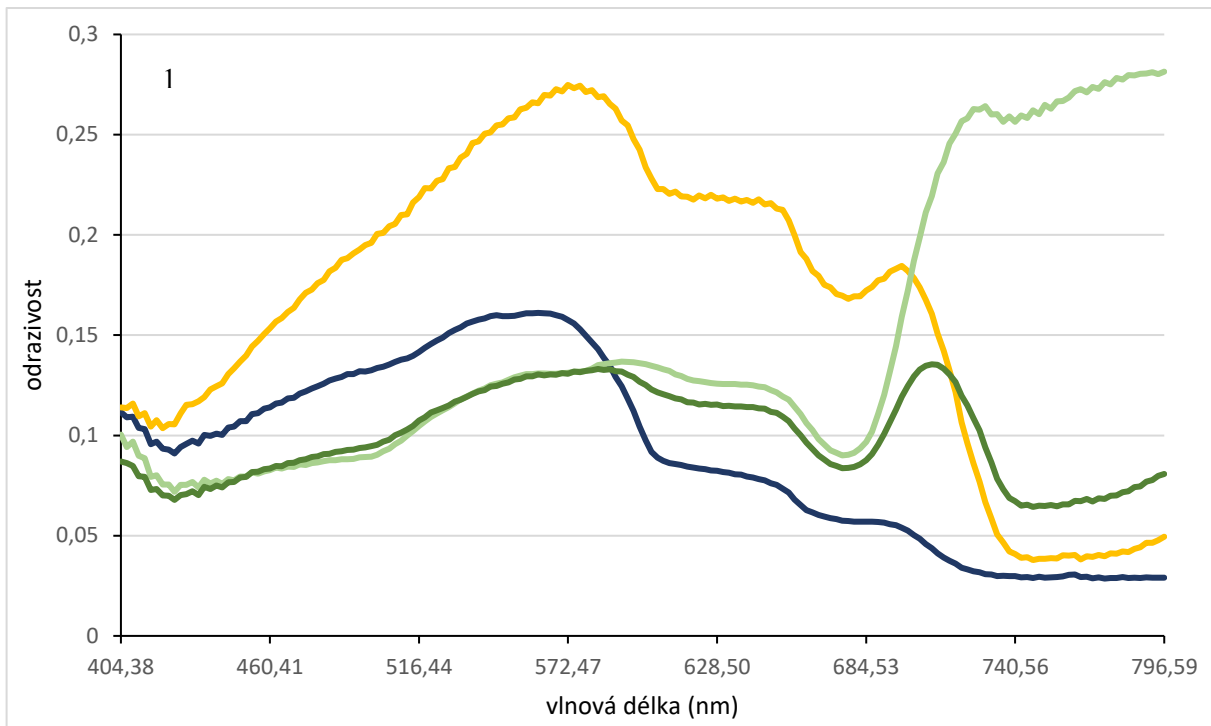
Snímky byly pořízeny v období od 25. 2. do 1. 3. 2023 pomocí dronu DJI Matrice 600 Pro, na kterém byla umístěna hyperspektrální kamera Headwall Nano-Hyperspec®, což je řádková kamera s šířkou záběru 640 pixelů a ohniskem 17 mm (Headwall Photonics, 2019). Kamera obsahuje také IMU a GNSS přijímač, informace z nich posloužily pro provedení základních geometrických korekcí v SW SpectralView - Hyperspec v3.1.0 dle (Cervena et al. 2020) do jednotlivých letových linií. Radiometrické korekce byly též provedeny v SW SpectralView - Hyperspec v3.1.0 (Cervena et al. 2020). Dodané letové linie obsahovaly 269 pásem v rozmezí vlnových délek od 398,784 nm do 1 001,84 nm. Pro účely práce byly snímky převzorkovány na 54 pásem (rozestup mezi pásmy 11,206 nm). Převzorkování bylo provedeno za účelem urychlení následných výpočetních operací jednotlivých analýz. Z grafů 1 a 2 je zřejmé, že spektrální křivky nezměnily svůj tvar natolik, aby převzorkování ovlivnilo výsledky.

Vodní sloupec významně ovlivňuje měření spektrálních vlastností mořského dna, přičemž absorpce vody se zvyšuje s rostoucí vlnovou délkou. Rozpuštěné organické látky v rámci vodního sloupce také přispívají k této absorpci. Pro korekci hloubky vody je zásadní mít informace o hloubce vody. Tyto údaje však pro tuto práci nejsou k dispozici, a jednotlivé analýzy byly provedeny bez nich (Hedley 2013; Yamano 2013). Za účelem minimalizace vlivu hloubky vody byla data oříznuta na oblast od 404,3808 nm do 796,594 nm (tj. 36 pásem).

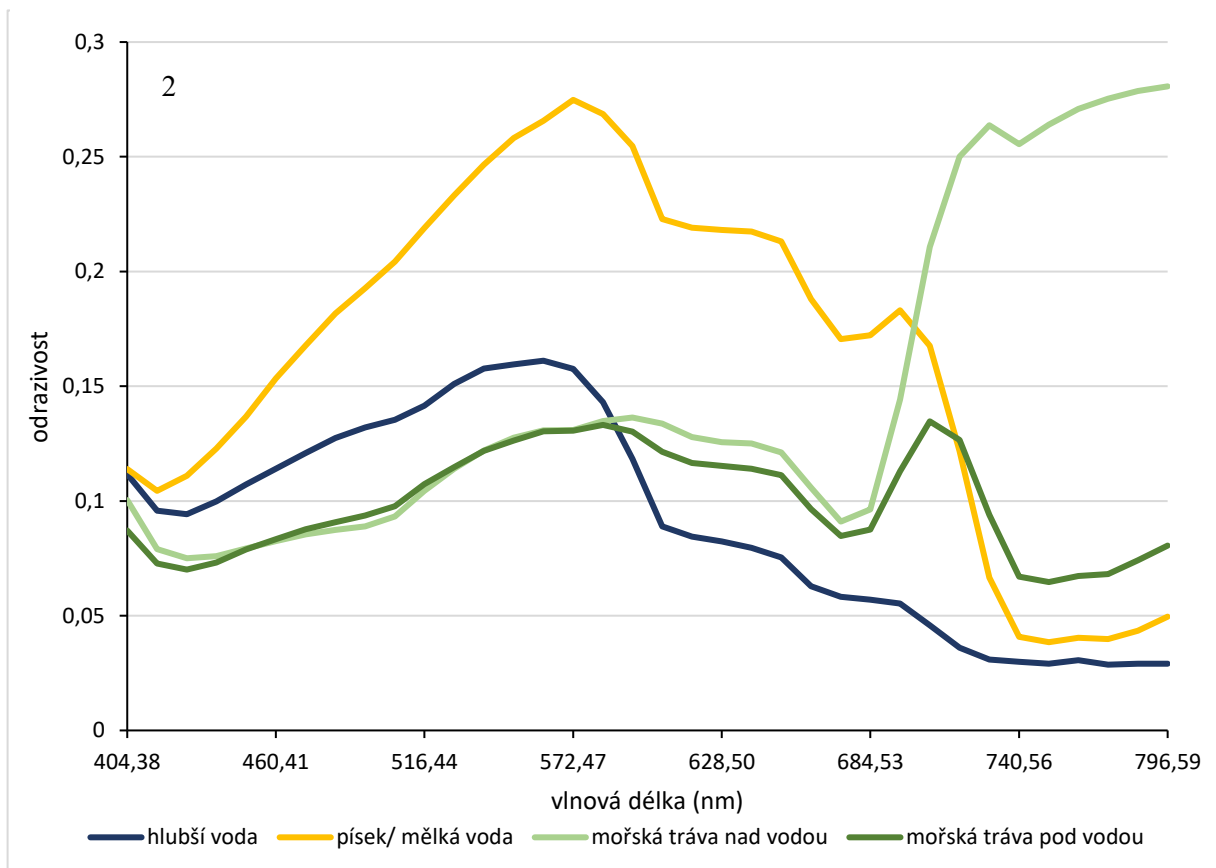
Pro analýzu korálových útesů a mořských trav byly vybrány tři oblasti (viz Tabulka 1) o prostorovém rozlišení 3,5 – 4 cm. První z nich, Coral Garden u ostrova Fulhadhoo (obr. 4), zahrnovala tři linie, v rámci práce byly využity 2 (CoralGarden_line02garden_raw7920 a CoralGarden_line03zpet_raw14703). Druhou zkoumanou oblastí byl korálový útes (obr. 4) s šesti pořízenými liniemi v rámci kterých se pracovalo také se 2 liniemi (F_Reef_line03_raw8912, F_Reef_line04_raw13328). Poslední analyzovaná oblast se nachází u ostrova Goidhoo a na rozdíl od předchozích lokalit se vyznačuje především přítomností mořských trav (obr. 3), u této oblasti byly zpracovány obě pořízené linie (SeaGrass_South_v2_line01_raw0 a SeaGrass_South_v2_line02_raw10528).

zájmová území	označení v práci	Akvizice		Expozice	Počet nasnímaných linií / zpracovaných
		Den	Čas GMT (Maledivy +5)		
Fulhadhoo – Coral Garden	Korálová zahrádka	2023-02-28	10:35:15	3,996	3 / 2
Fulhadhoo – Coral Reef	Korálový útes	2023-02-28	5:18:47	3,996	6 / 2
Goidhoo – Sea Grass – south	Mořská tráva	2023-02-27	5:47:26	3,996	2 / 2

Tabulka 1: Lokality zájmových území



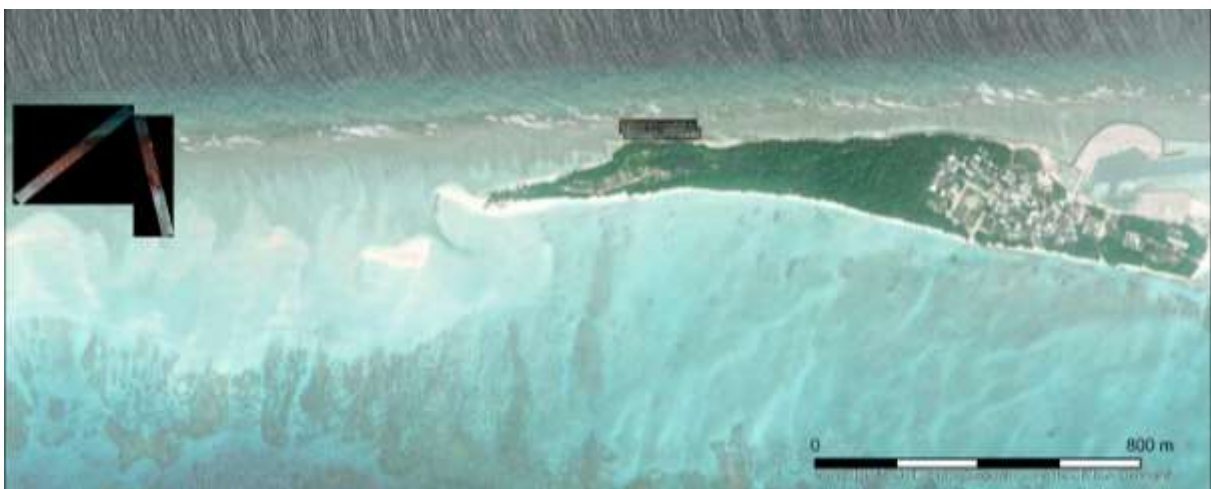
Graf 1: Nepřezorkovaná data oříznuta na rozpětí 404,38 - 796,59 (linie: SeaGrass_South_v2_line02_raw10528)



Graf 2: Přezorkovaná data na šířku pásma 11,206 nm (linie: SeaGrass_South_v2_line02_raw10528)



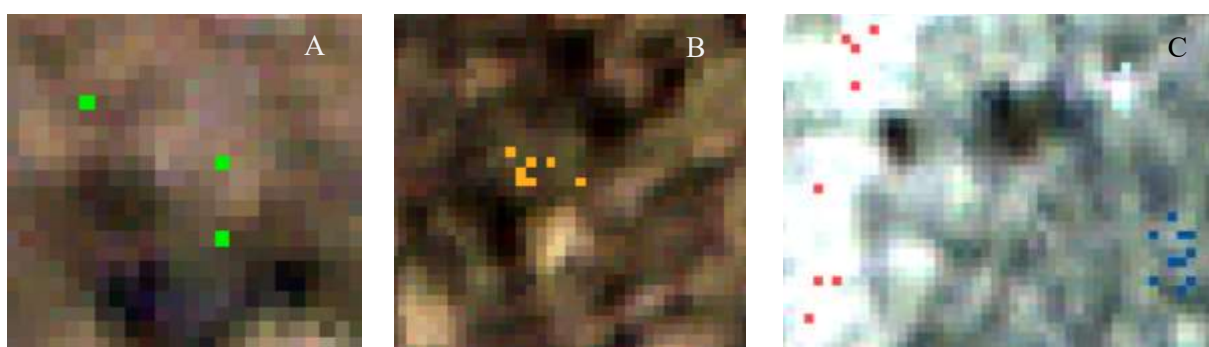
Obrázek 3: Lokalizace zájmového území mořské trávy u ostrova Goidhoo (Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community 2024)



Obrázek 4: Lokalizace zájmového území korálového útesu (vpravo) a korálové zahrádky (vlevo) u ostrova Fulhadhoo; (Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community 2024)

4.2 Výběr koncových členů

Koncové členy byly získány vizuální interpretací a výběrem pixelů charakteristických pro různé typy bentického dna na základě jejich optických a spektrálních vlastností dle kapitoly 2.3. Bylo rozlišeno celkem 13 typů dna mořského prostředí (tabulky 2-4 níže). Sběr koncových členů probíhal pro každé území zvlášť. Některé třídy byly opticky podobné, ale lišily se ve spektrálních vlastnostech, například korál nad vodou a hnědý/světlý korál (obr. 5). Naopak třídy písek s korálovou drtí a korálová drť s pískem byly opticky odlišitelné, ale měly podobné spektrální vlastnosti (obr. 3). Koncové členy byly následně exportovány do spektrální knihovny.



Obrázek 5: Porovnání koncových členů linie *F_Reef_line03_raw8912*: světlého/ hnědého korálu (A) a korálu nad vodou (B), (C) koncové členy tříd písku s korálovou drtí (červeně) a korálové drtě s pískem (modře)

Tabulka 3: Korálová zahrádka

Třídy	Počet pixelů
Korálová zahrádka světlá	114
Korálová zahrádka tmavá	93
Korálový útes	117
Korálový útes světlý	53
Písek	132
Hluboká voda	93

Tabulka 3: Korálový útes

Třídy	Počet pixelů
Hnědý/ světlý korál	124
Tmavý korál	107
Korálový útes nad mořem	70
Písek s korálovou drtí	94
Korálová drť s pískem	81

Tabulka 3: Mořská tráva

Třídy	Počet pixelů
Mořská tráva pod vodou	174
Mořská tráva nad vodou	90
Písek/ mělká voda	39
Hluboká voda	256

Tabulka 2, 3, 4: Název tříd a počet pixelů koncového členu v rámci ROI pro vybrané linie.

Jednotlivé kategorie byly určeny a pojmenovány na základě jejich optických a spektrálních vlastností. Nejprve byly rozlišeny opticky odlišné kategorie, například *mořská tráva* a *písek*, nebo různé typy korálů ve srovnání s pískem a hlubokou vodou. Poté byly rozděleny kategorie se stejnými typy, ale rozdílnými optickými vlastnostmi, například *světlá* a *tmavá korálová zahrádka* (obr. 6). V rámci stejné linie byly klasifikovány také třídy korálový útes a korálový útes – světlý, které se vlastnostmi lišily od tříd korálové zahrádky. Tyto třídy v rámci klasifikace byly sloučeny.

Opticky velmi podobné třídy byly určeny na základě spektrálních vlastností, což je patrné u tříd *světlý/ hnědý korál* a *korál nad vodou*, kde jsou spektrální křivky na nižších vlnových délkách velmi podobné, ale liší se v odrazivosti nad 700 nm (graf 3). U kategorie *korál nad mořem* nedochází k poklesu odrazivosti způsobeného vlastnostmi vody, což naznačuje, že se nachází nad vodou (Torres-Madronero, Velez-Reyes, a Goodman 2014).

Mořské trávy byly odděleny na základě stejných charakteristik. V rámci erozních procesů se z korálových útesů odlamují části z kterých se postupně stává korálová drť a karbonátové písky, které jsou mezi sebou velmi provázané (Wolfe, Kenyon, a Mumby 2021). Od tříd s koráli se liší barvou, ale mají podobné spektrální křivky odlišující se na vlnových délkách okolo 700 nm, z důvodu menší přítomnosti chlorofylu. Třídy *písek s korálovou drtí* a *korálová drť s pískem* byly od sebe odlišeny na základě vyšší odrazivosti *písku s korálovou drtí* na nižších vlnových délkách (Nurdin et al. 2012; Nimalan, Thanikachalam, a Usha 2021).

Kategorie hluboké vody je od ostatních tříd rozpoznatelná jak opticky, tak díky spektrálním vlastnostem kvůli absorpci vody na nižších vlnových délkách (Jiang et al. 2023).

4.2.2 Spektrální křivky tříd

Z ROI bylo vyextrahováno 15 spektrálních křivek pro 13 typů povrchu mořského dna. Hluboká voda a písek byly identifikovány na dvou územích. Pro každou linii byl získán jiný počet spektrálních křivek v závislosti na heterogenitě mořského dna, nejvíce typů dna bylo určeno pro korálovou zahrádku (6) (graf 3), naopak nejméně poté pro oblast mořské trávy (4) (graf 4). Spektrální křivky byly poté porovnány mezi jednotlivými liniemi pro určení rozlišností nebo podobných charakteristik na každém území. Z porovnání křivek mezi územími je patrná podobnost tvaru křivek prostředí, které obsahuje chlorofyl a liší se především velikostí odrazivosti. Ve viditelné části spektra je patrná největší odrazivost tříd

s písčnou charakteristikou. Nejmenší odrazivost vykazovaly tmavé typy tříd. Nad hranicí 700 nm vyčnívají se svou odrazivostí dvě třídy, které byl detekovány nad hranicí hladiny vody (mořská tráva nad vodou a korál nad vodou).



Obrázek 6: Porovnání tříd linie korálové zahrádky: korálová zahrádka – světlá (A) korálová zahrádka – tmavá (B), (C) korálový útes.

4.3 Klasifikace

Pro mapování bentického dna byly použity tři různé metody klasifikace mořského dna, které byly následně vzájemně porovnány. Získaná spektra koncových členů byla použita při řízené klasifikaci ve formě ROI souboru nebo spektrální knihovny. Jednotlivé klasifikační metody probíhaly v SW ENVI.

4.3.1 Řízená klasifikace (SAM a SID)

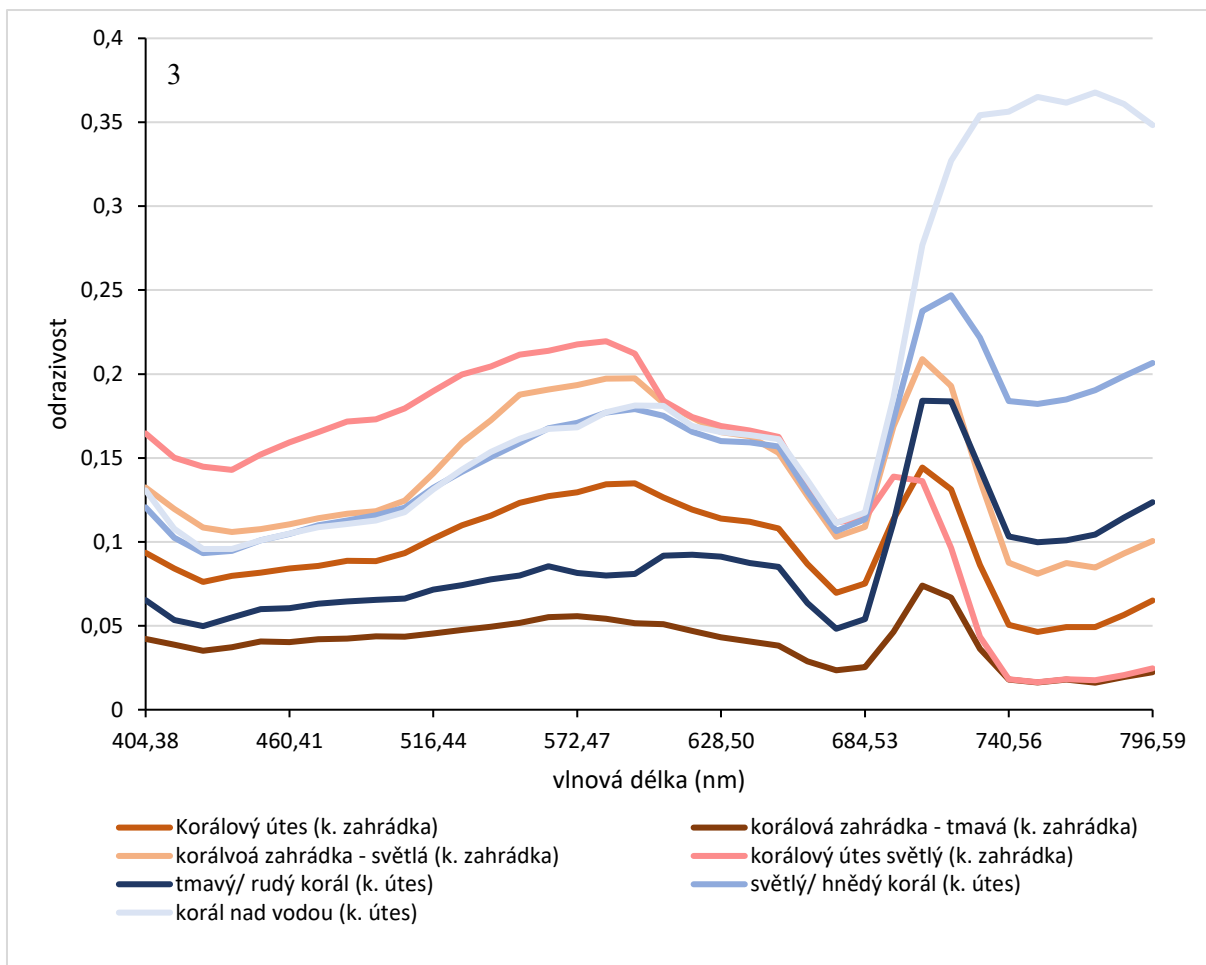
První provedenou klasifikací byl spectral angle mapper (SAM). SAM měří úhel mezi spektry a určuje tak jejich podobnost. Tato technika je necitlivá na osvětlení a albedo efekty a porovnává spektra pixelů s referenčními spektry, přičemž menší úhly znamenají větší podobnost. Pixely s úhlem větším než stanovený práh nejsou klasifikovány (Kruse et al. 1993). V rámci nastavení klasifikátoru bylo testováno více možností pro maximální úhel mezi referenčním spektrem a klasifikovaným, aby byl pixel přiřazen do dané třídy. Testovány byly možnosti bez maximálního úhlu a 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 radianu (Kutser, Miller, a Jupp 2006). Nejlépe byla klasifikovaná možnost s maximálním úhlem 0,4 radiánu. Referenční pixely byly získány z ROI nebo spektrální knihovny.

Druhým použitým klasifikátorem je Spectral information Divergence (SID). Tento klasifikátor přiřazuje pixely k referenčním spektrům podle míry jejich divergence, kdy menší divergence znamená větší podobnost. Pixely s divergencí větší než stanovený práh nejsou klasifikovány. Jako koncové členy byla použita spektrální knihovna vytvořena z ROI (Chang 2004). V rámci nastavení klasifikátoru bylo testováno různé rozpětí maximální divergence (od 0,05 do 0,2). Nejlepší výsledek vykazovala možnost s žádnou maximální hodnotou divergence.

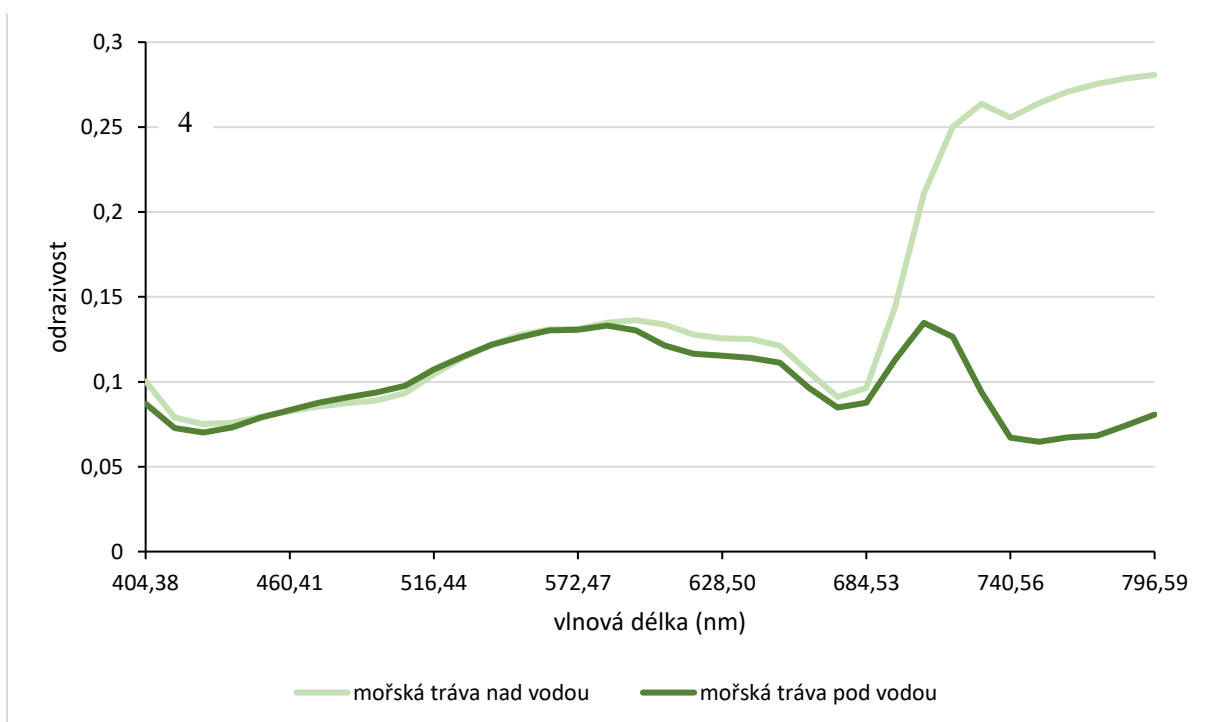
4.3.2 Neřízená klasifikace (ISODATA)

Třetí metodou, která byla využita v rámci analýz byla neřízená klasifikace ISODATA. Ta nejprve určí počáteční střední hodnotu tříd. Pixely jsou pak postupně přiřazovány k těmto třídám podle minimální vzdálenosti. V každé iteraci se přepočítají průměry a pixely se znovu přiřadí podle těchto nových průměrů. Třídy mohou být děleny, slučovány nebo mazány podle zadaných parametrů. Když se změny v počtu pixelů ve třídách stanou malé nebo je dosažen

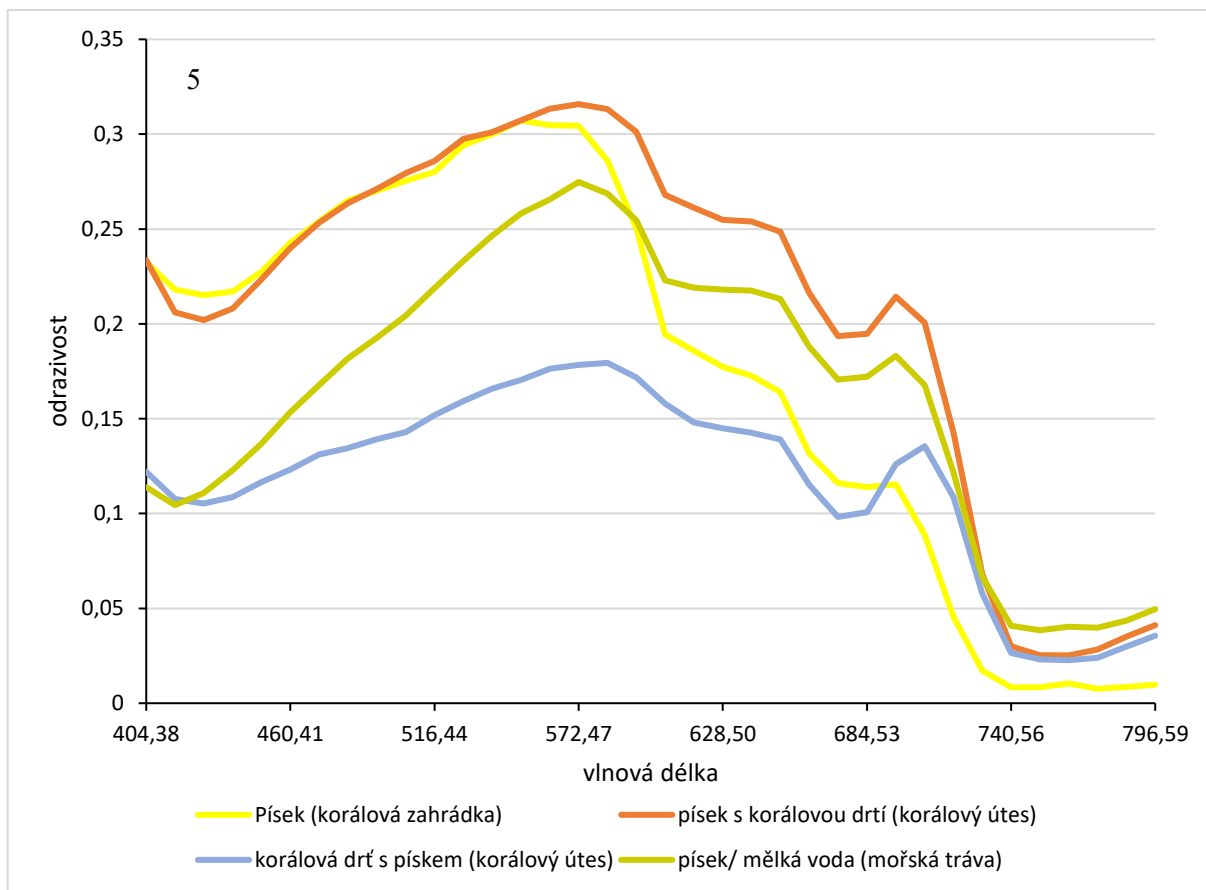
maximální počet iterací, tak klasifikace končí. Pro lepší výsledek je vhodné zvolit 2 – 3 krát větší hodnotu počtu tříd než je výsledný počet kategorií (Tou a Gonzalez 1974; Hedley 2013). V rámci této klasifikace byly vyzkoušeny dvě nastavení klasifikátoru. Nejprve byly využity přednastavené hodnoty v SW ENVI a změněno pouze rozpětí počtu tříd (min. 10, max. 20), a poté byly použito nastavení dle (Alterra - Earth informatics et al. 2017), kde byla zvýšena hodnota počtu maximu iterací na 10, rozpětí počtu tříd 10 – 15 a minimální počet pixelů pro třídu 1000. Další možnosti nastavení zůstaly stejné. V rámci obou nastavení byla použita maska pro černé pozadí, aby zůtalo neklasifikováno. Výsledky této metody se jeví lepší než při přednastavení v rámci SW, a tak dále bylo pracováno pouze s tímto nastavením.



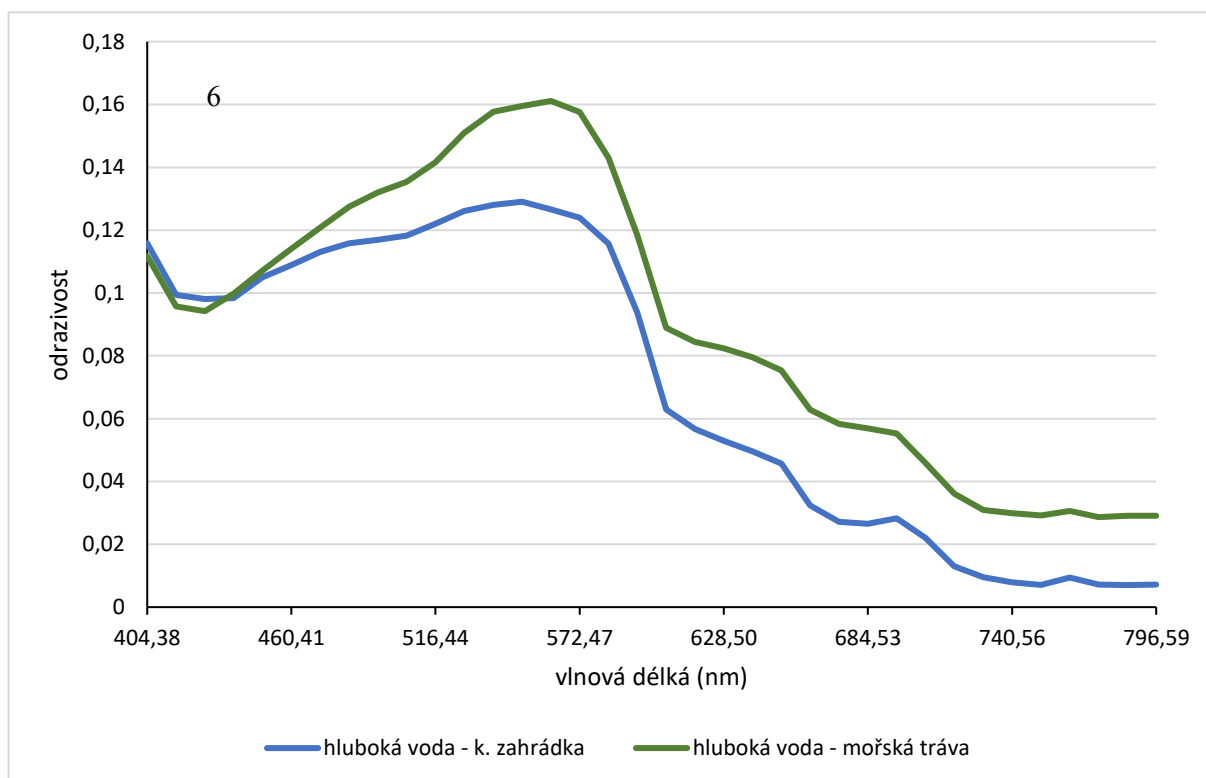
Graf 4: Porovnání spektrálních křivek tříd korálů na jednotlivých lokalitách



Graf 3: Spektrální křivky mořské trávy



Graf 6: Porovnání spektrálních křivek různých typů písčitého dna na jednotlivých lokalitách



Graf 5: Spektrální křivky třídy hluboká voda

5 Výsledky

5.1 Spektrální křivky

Grafy 3–5 zobrazují spektrální křivky pro jednotlivé prvky mořského dna v různých lokalitách. Graf 3 znázorňuje spektrální křivky tříd souvisejících s korály. Všechny křivky vykazují charakteristický znak přítomnosti chlorofylu, což je patrné z absorpčního pásu chlorofylu okolo 675 nm, po kterém následuje strmý nárůst odrazivosti (E. Hochberg 2003). Zároveň u tříd korálový útes, korálová zahrádka, korál nad mořem a světlý/ hnědý korál je patrný znak hnědého korálu se třemi lokálními maxima v oblastech 540 – 650 nm (Eric J. Hochberg et al. 2004). Na nižších vlnových délkách lze pozorovat rozdílné úrovně odrazivosti mezi jednotlivými typy korálových tříd, přičemž nejnižší odrazivost má *korálová zahrádka – tmavá*, zatímco nejvyšší odrazivost vykazuje *korálová zahrádka – světlá* a *korálový útes*.

Spektrální křivky mořské trávy (graf 4) jsou si velmi podobné, s největším rozdílem odrazivosti na vlnových délkách nad 700 nm, kde nedochází k absorpci vodou u kategorie *mořské trávy nad vodou*. U obou kategorií je také viditelná absorpce chlorofylu v oblasti 670 nm, obdobně jako u tříd korálů.

Spektrální křivky písků (graf 5) vykazují vyšší odrazivost na nižších vlnových délkách ve srovnání s ostatními třídami. Nejvyšší odrazivosti dosahují třídy v oblasti okolo 570 nm, po které následuje výrazný pokles odrazivosti. U těchto tříd je vidět zbytková přítomnost chlorofylu v rámci lokálního minima následujícího mírným nárůstem. Kategorie hluboké vody (graf 6) mají oproti ostatním třídám celkově nižší odrazivost, a zároveň absorpce vody už je patrná na nižších vlnových délkách.

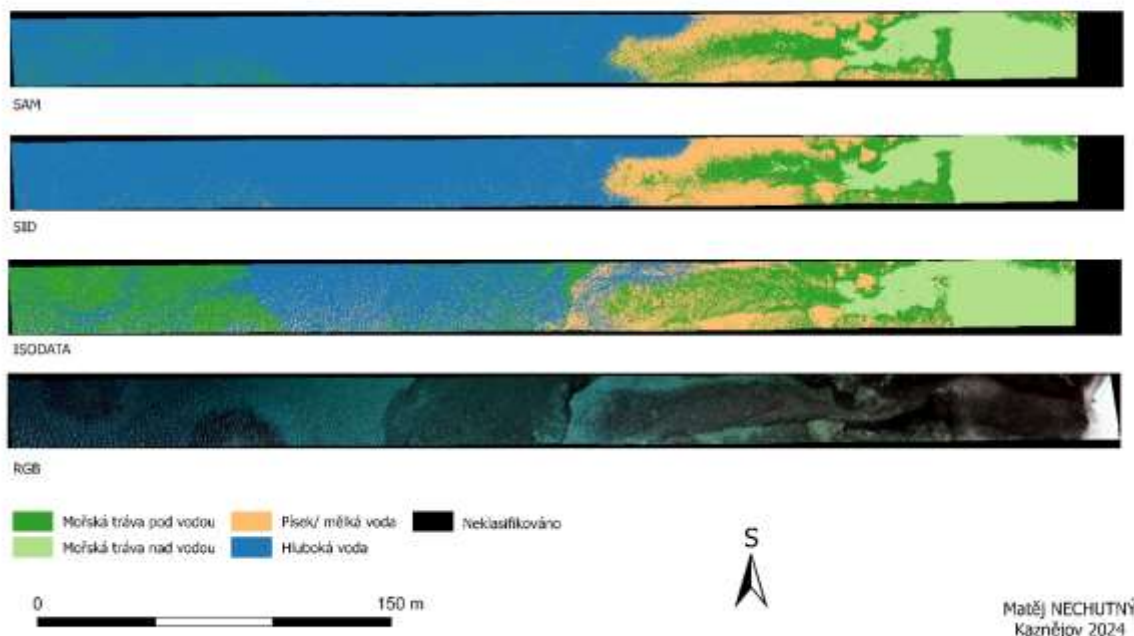
5.2 Klasifikace lokality mořské trávy

V rámci řízené klasifikace byly provedeny metody SAM a SID na všech vybraných zájmových územích a metoda ISODATA pro neřízenou klasifikaci. Referenční pixely tříd byly vždy získány nad jednou linií v dané oblasti a extrahovány do spektrální knihovny pro použití nad druhou linií. Přesnost klasifikací nemohla být provedena z důvodu chybějících validačních dat.

Výsledky v rámci řízené klasifikace nad stejným územím nejsou příliš rozdílné. Ve srovnání s RGB snímkem a neřízenou klasifikací jsou na některých místech vidět rozdílné prvky. V rámci linie mořské trávy (SeaGrass_south_v2_line01_raw0) se jedná například o klasifikaci prvků *hluboké vody*, kdy na RGB snímku jsou vidět tmavé znaky mořské trávy, ale obě řízené klasifikace tyto místa vyhodnotila jako hlubokou vodu, oproti tomu metoda ISODATA určila více pixelů v této oblasti pro prvky *mořské trávy pod vodou* a částečně kopírují tyto tmavé znaky viditelné na RGB snímku. (obr. 7). U druhé linie stejné lokality byla pro referenční spektra metod SAM a SID použita spektrální knihovna získaná nad vedlejší linií. V porovnání s RGB snímek a neřízenou klasifikací jsou vidět velké rozdíly v klasifikaci mořské trávy pod vodou, která se v rámci metod SAM a SID jeví jen v blízkosti mořské trávy nad vodou. Oproti tomu z metody ISODATA a RGB snímku je vidět rozsáhlejší území mořské trávy v dané oblasti. Tabulka 5 potvrzuje větší podíl zastoupení *mořské trávy pod vodou* oproti *hluboké vodě* ve srovnání s řízenou klasifikací.

SAM, SID, ISODATA KLASIFIKACE A RGB SNÍMEK

linie mořské trávy - SeaGrass_South_v2_line01_raw0



Obrázek 7: Porovnání metod řízené a neřízené klasifikace s RGB snímkem (linie mořské trávy)

metoda klasifikace	SAM		SID		ISODATA	
	počet pixelů	procento	počet pixelů	procento	počet pixelů	procento
Hluboká voda	3901133	56,0 %	4014056	57,6 %	2294906	32,9 %
písek/ mělká voda	950773	13,6 %	983157	14,1 %	1183866	17,0 %
mořská tráva nad vodou	1041381	14,9 %	1095018	15,7 %	1186612	17,0 %
mořská tráva pod vodou	1072773	15,4 %	873829	12,5 %	2300676	33,0 %

Tabulka 5: Počet pixelů a procento zastoupení v klasifikaci pro linii F_Reef_line04_raw13328

5.3 Klasifikace lokality korálového útesu

Pro lokalitu korálového útesu byly vybrány dvě linie, ve kterých byly pixely rozděleny do pěti tříd. U linie F_Reef_line04_raw13328 byly pomocí metody ISODATA třídy klasifikovány do čtyř tříd, přičemž po slučování nebyla zahrnuta třída *korál nad vodou*. Výsledky ukazují rozdílné klasifikace pixelů pro *korálovou drť*. V řízené klasifikaci bylo této třídě přiřazeno více pixelů než v metodě ISODATA, která je hodnotila jako písek nebo třídy s korály (obr. 8, 9). Ve třídě *tmavý/rudý korál* přiřadila metoda ISODATA přibližně o 10 % více pixelů než řízená klasifikace. Výsledky rovněž ukazují rozdíly mezi metodami řízené klasifikace; například metoda SAM přiřadila *světlému korálu* o 10 % více pixelů než metoda SID, přičemž tyto pixely pravděpodobně patří třídě *korálová drť* (tab. 6).

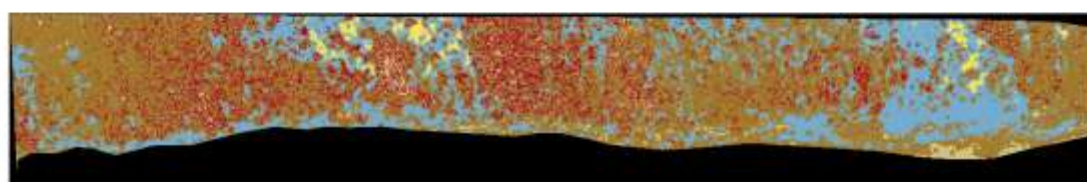
U druhé linie, F_Reef_line03_raw8912, odkud byly získány referenční pixely pro řízenou klasifikaci, jsou vidět rozdíly v rozložení pixelů ve třídě *tmavý/rudý korál* mezi všemi metodami. Mezi řízenou a neřízenou klasifikací je také patrný rozdíl ve třídě *korál nad mořem*, kde metody SAM a SID vykazují větší zastoupení této třídy. Zároveň oproti linii mořské trávy není vidět zásadní rozdíl v klasifikacích a na většině území jsou si metody v určování podobné.

metoda klasifikace	SAM		SID		ISODATA	
	počet pixelů	procento	počet pixelů	procento	počet pixelů	procento
Písek a korálová drť	38010	1,6 %	33343	1,4 %	219512	9,5 %
korálová drť a písek	548134	23,6 %	776377	33,5 %	421579	18,2 %
tmavý/ rudý korál	300192	12,9 %	316021	13,6 %	512796	22,1 %
světlý/ hnědý korál	1341604	57,8 %	1087062	46,8 %	1166702	50,3 %
korál nad vodou	92649	4,0 %	107786	4,6 %	0	0,0 %

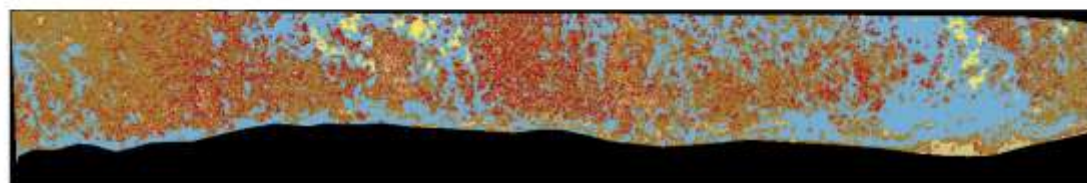
Tabulka 6: Počet pixelů a procento zastoupení v klasifikaci pro linii F_Reef_line04_raw13328

SAM a SID KLASIFIKACE

linie korálového útesu - F_Reef_line04_raw13328



SAM



SID

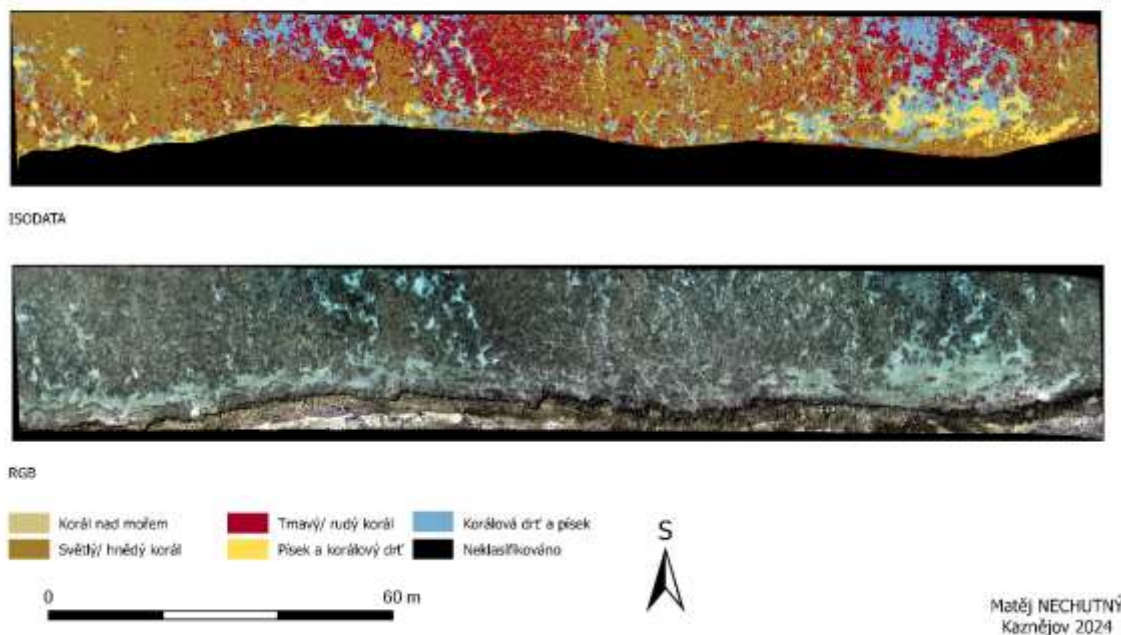


Matěj NECHUTNÝ
Kaznějov 2024

Obrázek 8: Porovnání metod řízené klasifikace (linie korálového útesu)

ISODATA KLASIFIKACE A RGB SNÍMEK

linie korálového útesu - F_Reef_line04_raw13328



Obrázek 9: Porovnání metod neřízené klasifikace s RGB snímkem (linie korálového útesu)

5.4 Klasifikace lokality korálové zahrádky

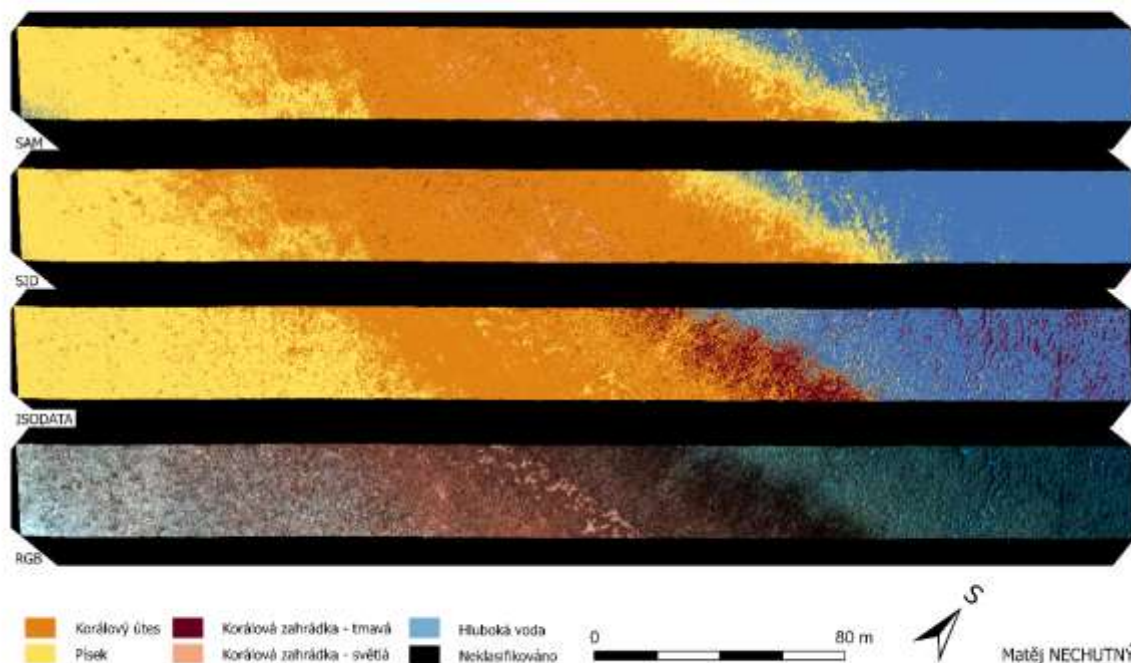
Korálová zahrádka byla poslední lokalitou, která byla klasifikována. Pixely charakterizující prvky pro řízenou klasifikaci byly extrahovány z linie CoralGarden_line02garden_raw7920. Pro klasifikaci bylo vybráno šest tříd, přičemž třídy *korálový útes* a *světlý korálový útes* byly následně sloučeny. V rámci územního zastoupení všechny klasifikace určily podobně třídu *světlé korálové zahrádky* a také většinu území s *pískem* (tab. 7). Nicméně, mezi řízenou a neřízenou klasifikací existují rozdíly v rozložení *písku* při přechodu mezi *korálovým útesem* a *hlubokou vodou*. RGB snímek ukazuje tmavší zbarvení dna, což naznačuje, že klasifikace *tmavé korálové zahrádky* je asi přesnější. Tato třída se nachází také na okraji korálové zahrádky, kde byla podobně určena ve všech klasifikacích. Naopak, metoda ISODATA nesprávně klasifikovala část pixelů jako *hlubokou vodu* v okolí korálové zahrádky.

V neřízené klasifikaci pro linii CoralGarden_line01tam_raw0 nebyla po slučování tříd zahrnuta třída *světlé korálové zahrádky*. Metody SAM a SID tuto třídu také vyhodnotily jen v malém množství, pokrývajícím mezi 1–2 % pixelů. Naopak, u třídy *tmavé korálové zahrádky* bylo v neřízené klasifikaci identifikováno více pixelů. Řízené klasifikace tyto pixely často označily jako *písek* nebo *hlubokou vodu*, avšak v ostatních oblastech s pískem a hlubokou vodou se všechny metody shodují (obr. 10). Další třída, kde klasifikace vykázaly podobné výsledky, je *korálový útes*.

metoda klasifikace	SAM		SID		ISODATA	
	počet pixelů	procento	počet pixelů	procento	počet pixelů	procento
Hluboká voda	552005	12,9 %	455518	10,7 %	764250	17,9 %
písek	2025287	47,4 %	2030929	47,5 %	1797879	42,1 %
korálový útes	1319836	30,9 %	1470137	34,4 %	1091439	25,5 %
korálová zahrádka – tmavá	108169	2,5 %	86725	2,0 %	426582	10,0 %
korálová zahrádka – světlá	269347	6,3 %	231335	5,4 %	194494	4,5 %

Tabulka 7: Počet pixelů a procento zastoupení v klasifikaci pro linii CoralGarden_line02garden_raw7920

SAM, SID, ISODATA KLASIFIKACE A RGB SNÍMEK linie korálové zahrádky - CoralGarden_line01tam_raw0



Obrázek 10: Porovnání metod řízené a neřízené klasifikace s RGB snímkem (linie korálové zahrádky)

6 Diskuse

Cílem praktické části bylo ukázat rozdílnost spektrálních křivek prvků korálového prostředí a možnosti využití klasifikace pro mapování korálových útesů a mořské trávy. Kvůli nedostatku pozemního sběru dat tato práce nepřináší přesné výsledky, ale spíše přehled možností a proveditelnosti mapování.

(Hochberg) určil dva základní typy korálů dle tvaru spektrální křivky na modrý a hnědý typ. Rozdíl mezi nimi spočívá v počtu vrcholů v rozmezí vlnových délek 550–650 nm. Třídy korálového útesu, tmavé korálové zahrádky, korálu nad vodou a světlého/ hnědého korálu vykazují trojitý vrchol na těchto vlnových délkách a odpovídají tak hnědému typu korálů.

I když to není z grafu patrné kvůli vyšší odrazivosti ostatních tříd, tak vyšší odrazivost v rozmezí 550–650 nm mají také třídy tmavé korálové zahrádky a tmavý/ rudý korál. V rámci pixelů, které jsou zbarveny do ruda především u lokality korálového útesu se může jednat o červené řasy díky podobné spektrální křivce a charakteristického znaku na vlnové délce 568 nm (Leiper et al. 2014). Jediná třída světlého korálového útesu má odlišný tvar křivky od ostatních tříd korálů a spektrálně je tak více podobná třídám korálové drti, i když opticky se jeví spíše k třídám korálů (graf 5).

Porovnání spektrálních křivek mořské trávy s (Thorhaug, Richardson, a Berlyn 2007), kteří měřili spektrální křivky laboratorně pro 3 druhy tropický mořských trav. Tyto druhy mořských trav mají v rozmezí 500–550 nm prudší nárůst odrazivosti oproti mořské trávě z okolí atolu Goidhoo. (Lesser a Mobley 2007) měřili odrazivost mixu mořské trávy s písčným dnem v různých poměrech. U těchto křivek není patrný tak rychlý nárůst odrazivosti v rozmezí 500–550 nm a jsou více podobné námi získanými spektry.

V rámci 4 tříd pro písčnou kategorii jsou vidět znaky přítomnosti chlorofylu u tří (korálové drti s pískem, písku s korálovou drtí a písku z lokality s mořskou trávou). Tato zbytková přítomnost chlorofylu je způsobena pravděpodobně řasami, které se v prostředí korálových útesů na písku usazují (Roelfsema, Phinn, a Dennison 2002).

V rámci klasifikací lokalit jsou vidět značné rozdíly mezi určením tříd v závislosti na použité metodě. Některá místa na snímcích se zdají být lépe určena v rámci řízené klasifikace, ale jiná zas naopak, u neřízené klasifikace. Nelze ale říci, která klasifikace vykázala přesnější výsledky, jelikož nejsou k dispozici kontrolní údaje z terénu, na nichž bychom tvrzení potvrdili. Vše je tak porovnáváno s RGB snímkem, spektrálními křivky nebo literaturou.

U všech metod je však vidět určitá klasifikace do stejných tříd opticky podobné prvky z RGB snímku. Zároveň jsou vidět taky klasifikace části tříd, které se od ostatních pixelů viditelně liší. Tyto příčinu mohou být v neprovedené atmosférické, ale především hloubkové korekce. (Teja Kondraju et al. 2014) porovnávali celkové přesnosti klasifikace korálového prostředí z družicových snímků v závislosti na provedení atmosférické a hloubkové korekce. Bez použití korekcí SAM a SID měli přesnost 72,01 % a 62,41 %. Po aplikaci korekcí se tato přesnost zvýšila na 89,84 % (SAM) a 91,36 (SID).

(Sutrisno, Sugara, a Darmawan 2021) Použili k mapování korálů, mořské trávy, písku a mixu mořské trávy, řas a korálové drti dvě metody neřízené klasifikace (K-means, ISODATA) a řízenou klasifikace. Větší přesnost ukazovali metody neřízené klasifikace (ISODATA 78 %, K-means 82 %) oproti řízené klasifikaci (71 %). Ve studované oblasti se jeví lokalita mořské trávy lépe klasifikovaná pomocí metody neřízené klasifikace s řízenou klasifikací.

Pravděpodobně lepší výsledky pro metodu ISODATA jsme získali na lokalitě mořské trávy, především u linie SeaGrass_South_v2_line02_raw10528 se třída mořské trávy jeví klasifikována lépe než u metod řízené klasifikace.

Výsledky klasifikací prokazují, že jde mezi sebou odlišit jednotlivé složky mořského dna na daném území, ale zároveň při porovnání s RGB snímky jsou vidět značné nepřesnosti, které mohou být daný nepřesným určením koncových členů nebo neprovedením například hloubkové korekce. Zároveň k přesnějším výsledkům by přispělo více informací z terénu.

7 Závěr

Cílem této práce bylo představit možnosti dálkového průzkumu korálových útesů a mořské trávy s analýzou klasifikací na území Malediv. Teoretická část se nejprve zabývá představením a charakteristikou zkoumaných ekosystémů, konkrétně korálových útesů a mořské trávy. Dále jsou popsány spektrální vlastnosti mořských prvků a jejich vzájemné odlišnosti. Rovněž jsou uvedeny faktory ovlivňující tyto ekosystémy a jejich spektrální křivky. Následně je představena zájmová oblast Malediv a konkrétně ostrovy Goidhoo a Fulhadhoo, kde byla data získána.

Praktická část se nejprve zaměřuje na sběr a výběr dat, v rámci něhož byly vybrány tři zájmové oblasti: mořská tráva, korálová zahrádka a korálový útes. Popis postupu analýz zahrnuje výběr koncových členů a vytvoření legendy pro jednotlivé klasifikace, přičemž každý člen legendy charakterizuje odlišné spektrální křivky. Před analyzováním výsledků jsou popsány použité klasifikace a jejich nastavení. Pro řízenou klasifikaci byly použity metody Spectral Angle Mapper a Spectral Information Divergence, zatímco pro neřízenou klasifikaci byla použita metoda ISODATA.

Následně byly vyhodnoceny spektrální křivky jednotlivých kategorií klasifikací, které ukázaly rozdíly mezi prvky mořského dna. Zároveň spektrální křivky tříd, které se vyskytují na více územích byly porovnány mezi sebou. Pro každou zkoumanou lokalitu byly vybrány dvě linie, u nichž byly provedeny dvě řízené a jedna neřízená klasifikace. Výsledky ukázaly, že na některých lokalitách jsou klasifikace tříd podobné, jako například v případě korálového útesu. Naopak u linie mořské trávy byly zjištěny značné rozdíly mezi řízenou a neřízenou klasifikací ve srovnání s RGB snímkem. Pravděpodobně lepších výsledků a vyšší přesnosti by bylo dosaženo použitím metod, které zahrnují hloubkovou korekci nebo více dat z daných lokalit.

8 Seznam použitých zdrojů

8.1 Odborná literatura

- ASNER, GREGORY P., NICHOLAS R. VAUGHN, CHRISTOPHER BALZOTTI, PHILIP G. BRODRICK, A JOSEPH HECKLER. (2020): High-Resolution Reef Bathymetry and Coral Habitat Complexity from Airborne Imaging Spectroscopy *Remote Sensing*.
- CLARK, C. D., P. J. MUMBY, J. R. M. CHISHOLM, J. JAUBERT, A S. ANDREFOUET. (2000): Spectral Discrimination of Coral Mortality States Following a Severe Bleaching Event. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 11, 2321–27
- Alterra – Earth informatics, PE&RC, Laboratory of Geo-information Science and Remote Sensing, IMARES Onderzoeksformatie, Sander Múcher, Juha Suomalainen, John Stuiver, a Erik Meesters. (2017): Hyperspectral Coral Reef Classification of Bonaire. Den Helder: Wageningen Marine
- CERVENA, LUCIE, JAKUB LYSÁK, MARKETA POTUCKOVÁ, A LUCIE KUPKOVÁ. (2020) Zkušenosti se zpracováním hyperspektrálních dat pořízených UAV
- DARAMOLA, SAMUEL, HUAN LI, EBENEZER OTOO, TEMITOPE IDOWU, A ZHENG GONG. (2022): Coastal Evolution Assessment and Prediction Using Remotely Sensed Front Vegetation Line along the Nigerian Transgressive Mahin Mud Coast. *Regional Studies in Marine Science*, 50.
- DINNAT, EMMANUEL P., DAVID M. LE VINE, JACQUELINE BOUTIN, THOMAS MEISSNER, A GARY LAGERLOEF. (2019): Remote Sensing of Sea Surface Salinity: Comparison of Satellite and In Situ Observations and Impact of Retrieval Parameters. *Remote Sensing*, 11, 7, 750.
- FINGAS, MERV, A CARL BROWN. (2017): A Review of Oil Spill Remote Sensing". *Sensors*, 18, 1, 91.
- GAO, JAY. (2009): Bathymetric Mapping by Means of Remote Sensing: Methods, Accuracy and Limitations. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 33, 1, 103–16.
- GLYNN, PETER W., DEREK P. MANZELLO, A IAN C. ENOCHS, ED. (2017): *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific: Persistence and Loss in a Dynamic Environment*. Springer Netherlands, 8.
- GODFREY, TIMOTHY J. (2018): *Atlas of the Maldives: A Reference for Travellers, Divers and Sailors*, 6th edition.
- GOODMAN, JAMES A., SAMUEL J. PURKIS, A STUART R. PHINN, ED. (2013): *Coral Reef Remote Sensing: A Guide for Mapping, Monitoring and Management*. Springer Netherlands.
- HEDLEY, JOHN D. (2013): Hyperspectral applications. In *Coral Reef Remote Sensing*, Springer Netherlands. 79–112.
- HERON, SCOTT F., MALCOLM L. HERON, A WILLIAM G. PICHEL. (2013): Thermal and Radar Overview. In *Coral Reef Remote Sensing*. Springer Netherlands. 285–31.
- HOCHBERG, E. (2003): Spectral Reflectance of Coral Reef Bottom-Types Worldwide and Implications for Coral Reef Remote Sensing. *Remote Sensing of Environment*, 85, 2, 159–73.
- HOCHBERG, E. J., A M. J. ATKINSON. (2000): Spectral discrimination of coral reef benthic communities. *Coral Reefs* 19, 2, 164–71

- HOCHBERG, ERIC J., MARLIN J. ATKINSON, AMY APPRILL, A SERGE ANDRETOUFT. (2004): Spectral reflectance of coral. *Coral Reefs*. 23, 1, 84–95.
- CHANG, CHEIN-I. (2004): New Hyperspectral Discrimination Measure for Spectral Characterization. *Optical Engineering*, 43, 8, 1777.
- ISERN-FONTANET, JORDI, JOAQUIM BALLABRERA-POY, ANTONIO TURIEL, A EMILIO GARCÍA-LADONA (2017): Remote Sensing of Ocean Surface Currents: A Review of What Is Being Observed and What Is Being Assimilated. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 24, 4, 613–43.
- JIANG, GUANGJIA, SHUISEN CHEN, XINRUI WANG, WEI DENG, ZEBIN ZHUANG, LIHONG ZENG, CHUNCHAO ZHANG, A WEI YU. (2023). Water Optical Properties over or around Coral Reefs in the Coastal Region: Implications for Coral Reef Remote Sensing. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 40, 92768–81.
- JONES, N.L., N.L. PATTEN, D.L. KRIKKE, R.J. LOWE, A.M. WAITE, A G.N. IVEY. (2014): Biophysical Characteristics of a Morphologically-Complex Macrotidal Tropical Coastal System during a Dry Season. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 149, 96–108.
- JUN CHANG, GAOHUAN LIU, CHONG HUANG, A LIRONG XU. (2005): Remote sensing monitoring on coastline evolution in the Yellow River Delta since 1976. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005*. 5, 3, 2161–64.
- KAMAL, MUHAMMAD, A STUART PHINN. (2011): Hyperspectral Data for Mangrove Species Mapping: A Comparison of Pixel-Based and Object-Based Approach. *Remote Sensing* 3, 10, 2222–42.
- KLEMAS, V. (2013): Remote Sensing of Emergent and Submerged Wetlands: An Overview. *International Journal of Remote Sensing* 34, 18, 6286–6320.
- KRUSE, F.A., A.B. LEFKOFF, J.W. BOARDMAN, K.B. HEIDEBRECHT, A.T. SHAPIRO, P.J. BARLOON, A A.F.H. GOETZ. (1993): The Spectral Image Processing System (SIPS)—Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. *Remote Sensing of Environment* 44, 2–3, 145–63.
- KUMAR, AVINASH, A.C. NARAYANA, A K.S. JAYAPPA. (2010). Shoreline Changes and Morphology of Spits along Southern Karnataka, West Coast of India: A Remote Sensing and Statistics-Based Approach. *Geomorphology* 120, 3–4, 133–52.
- KUTSER, TIIT, JOHN HEDLEY, CLAUDIA GIARDINO, CHRIS ROELFSEMA, A VITTORIO E. BRANDO. (2020). Remote Sensing of Shallow Waters – A 50 Year Retrospective and Future Directions. *Remote Sensing of Environment* 240, 111619.
- KUTSER, TIIT, IAN MILLER, A DAVID L.B. JUPP. (2006): Mapping Coral Reef Benthic Substrates Using Hyperspectral Space-Borne Images and Spectral Libraries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 70, 3, 449–60.
- LEE, ZHONGPING, JOHN MARRA, MARY JANE PERRY, A MATI KAHRU. (2015): Estimating Oceanic Primary Productivity from Ocean Color Remote Sensing: A Strategic Assessment. *Journal of Marine Systems*, 149, 50–59.
- LEIPER, IAN, STUART PHINN, CHRIS ROELFSEMA, KAREN JOYCE, A ARNOLD DEKKER. (2014): Mapping Coral Reef Benthos, Substrates, and Bathymetry, Using Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) Data. *Remote Sensing*, 6, 7, 6423–45.

- LESSER, M. P., A C. D. MOBLEY. (2007): Bathymetry, Water Optical Properties, and Benthic Classification of Coral Reefs Using Hyperspectral Remote Sensing Imagery. *Coral Reefs*, 26, 4, 819–29.
- MARK STEWAR A SARAH FAIRFULL. (2007). Seagrass. *primefacts*, 629, 10.
- MAZEL, CHARLES H. (1997): Coral fluorescence characteristics: excitation/emmission spectra, fluorescence efficiencies, and contribution to apparent reflectance, 240–45.
- MILLER, J. L., & GOODBERLET, M. (2004): Development and applications of STARRS: a next generation airborne salinity imager. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 7–8, 1319–1324.
- MINNETT, P.J., A. ALVERA-AZCÁRATE, T.M. CHIN, G.K. CORLETT, C.L. GENTEMANN, I. KARAGALI, X. LI, ET AL. (2019): Half a Century of Satellite Remote Sensing of Sea-Surface Temperature. *Remote Sensing of Environment* 233, 111366.
- MISHRA, DEEPAK, A RICHARD GOULD. (2016): Preface: Remote Sensing in Coastal Environments. *Remote Sensing* 8, 8, 665.
- NIMALAN, KANDASAMI, MUNIAPPAN THANIKACHALAM, A TUNE USHA. (2021): Spectral Characteristics of Coral Reef Benthic Compositions in Gulf of Mannar. *Journal of Earth System Science*, 130, 1, 58.
- NURDIN, NURJANNAH, TERUHISA KOMATSU, HIROYA YAMANO, GULAM ARAFAT, CHAIR RANI, A M. AKBAR AS. (2012): Spectral response of the coral rubble, living corals, and dead corals: study case on the Spermonde Archipelago, Indonesia. 85251A.
- OSWALD, FRANZ, FLORIAN SCHMITT, ALEXANDRA LEUTENEGGER, SERGEY IVANCHENKO, CECILIA D'ANGELO, ANYA SALIH, SVETLANA MASLAKOVA, ET AL. (2007): Contributions of Host and Symbiont Pigments to the Coloration of Reef Corals. *The FEBS Journal*, 274, 4, 1102–22.
- PFLEGER VÁCLAV. (1989): *Korálový útes*. Praha. Academia.
- PHILPOT, WILLIAM D. (1989): Bathymetric Mapping with Passive Multispectral Imagery. *Applied Optics*, 28, 8, 1569.
- PURKIS, SAMUEL J., A JOHN C. BROCK. (2013): LiDAR Overview. In *Coral Reef Remote Sensing*, Springer Netherlands 115–43.
- R. RHODES, EDWARD, A HUMOOD NASER, ED. (2021): *Natural Resources Management and Biological Sciences*.
- RASHEED, SHUAIB, SIMON C. WARDER, YVES PLANCHEREL, A MATTHEW D. PIGGOTT. (2021): An Improved Gridded Bathymetric Data Set and Tidal Model for the Maldives Archipelago. *Earth and Space Science*, 8, 5.
- ROELFSEMA, C., S. PHINN, A W. DENNISON. (2002): Spatial Distribution of Benthic Microalgae on Coral Reefs Determined by Remote Sensing. *Coral Reefs*, 21, 3, 264–74.
- SHAVER, ELIZABETH C., LISA BOSTRÖM EINARSSON, MARGAUX HEIN, JEFF MAYNARD, IAN MICHAEL MCLEOD, JENNIFER KOSS, A LYZA JOHNSTON. (2020): A Manager's Guide to Coral Reef Restoration Planning and Design.
- SHORT, F. T., C. A. SHORT, A A. B. NOVAK. (2016): Seagrasses. *The Wetland Book*, Springer Netherlands, 1–19.

- STUMPF, RICHARD P., KRISTINE HOLDERIED, A MARK SINCLAIR. (2003): Determination of Water Depth with High-resolution Satellite Imagery over Variable Bottom Types. *Limnology and Oceanography*, 48, 547–56.
- SUN, QINGYANG, DANLING TANG, A SUFEN WANG. (2012): Remote-Sensing Observations Relevant to Ocean Acidification. *International Journal of Remote Sensing*, 33, 23, 7542–58.
- SUTRISNO, D, A SUGARA, A M DARMAWAN. (2021): The Assessment of Coral Reefs Mapping Methodology: An Integrated Method Approach. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 750, 1, 012030
- TEJA KONDRAJU, TARUN, VENKATA RAVI BABU MANDLA, R.S. MAHENDRA, A T. SRINIVAS KUMAR. (2014): Evaluation of Various Image Classification Techniques on Landsat to Identify Coral Reefs. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 5, 2, 173–84.
- THORHAUG, A., A. D. RICHARDSON, A G. P. BERLYN. (2007): Spectral Reflectance of the Seagrasses: *Thalassia Testudinum* , *Halodule Wrightii* , *Syringodium Filiforme* and Five Marine Algae". *International Journal of Remote Sensing* 28, 7, 1487–1501
- TORRES-MADRONERO, MARIA C., MIGUEL VELEZ-REYES, A JAMES A. GOODMAN. (2014). Subsurface unmixing for benthic habitat mapping using hyperspectral imagery and lidar-derived bathymetry.
- TOU, JULIUS T., A RAFAEL C. GONZALEZ. (1974): *Pattern recognition principles*. Applied mathematics and computation, Mass: Addison-Wesley Pub. Co, 7.
- TRUJILLO, ALAN P., A HAROLD V. THURMAN. (2020): *Essentials of Oceanography*. Thirteenth edition. Hoboken, NJ: Pearson.
- UNSWORTH, RICHARD K. F., LEANNE C. CULLEN-UNSWORTH, BENJAMIN L. H. JONES, A RICHARD J. LILLEY. (2022): The Planetary Role of Seagrass Conservation. *Science* 377, 6606, 609–13.
- UNSWORTH, RICHARD K. F., LEN J. MCKENZIE, CATHERINE J. COLLIER, LEANNE C. CULLEN-UNSWORTH, CARLOS M. DUARTE, JOHAN S. EKLÖF, JESSIE C. JARVIS, BENJAMIN L. JONES, A LINA M. NORDLUND. (2019): Global Challenges for Seagrass Conservation. *Ambio*, 48, 8, 801–15.
- VIDHYA, R., D. VIJAYASEKARAN, M. AHAMED FAROOK, S. JAI, M. ROHINI, A A. SINDUJA. (2014): Improved Classification of Mangroves Health Status Using Hyperspectral Remote Sensing Data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 8, 667–70.
- WOLFE, KENNEDY, TANIA M. KENYON, A PETER J. MUMBY. (2021). The Biology and Ecology of Coral Rubble and Implications for the Future of Coral Reefs. *Coral Reefs* 40, 6, 1769–1806.
- YAMANO, HIROYA. (2013): Multispectral Applications. In *Coral Reef Remote Sensing*, Springer Netherlands , 51–78.

8.2 Internetové zdroje

MALDIVES LAND AND SURVEY AUTHORITY (2021): About OneMap [cit. 30. 6. 2024].

Dostupné z: <https://readme.onemap.mv/>

MALDIVES METEOROLOGICAL SERVICE (2024): Climate of Maldives [cit. 30. 6. 2024]

<https://www.meteorology.gov.mv/climate>

NOAA (2013): How Do Coral Reefs Form: Corals Tutorial [cit. 20. 3. 2024]

https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_corals/coral04_reefs.html.

NOAA (2024) In what types of water do corals live? [cit. 20. 3. 2024]

<https://oceanservice.noaa.gov/facts/coralwaters.html>.

REYNOLDS P. L. (2018). Seagrass and Seagrass Beds [cit. 21. 3. 2024]

<https://ocean.si.edu/ocean-life/plants-algae/seagrass-and-seagrass-beds>.

SEAGRASSWATCH (2023) What Is Seagrass [cit. 22. 3. 2024]

<https://www.seagrasswatch.org/seagrass/>.

UNIVERSITY OF TECHNOLOGY SYDNEY (2019) Salinity of Seawater Ruining Coral Chemistry [cit. 21. 3. 2024]

<https://www.uts.edu.au/news/social-justice-sustainability/salinity-seawater-ruining-coral-chemistry>

US EPA, OW (2017) Threats to Coral Reefs [cit. 21. 3. 2024]

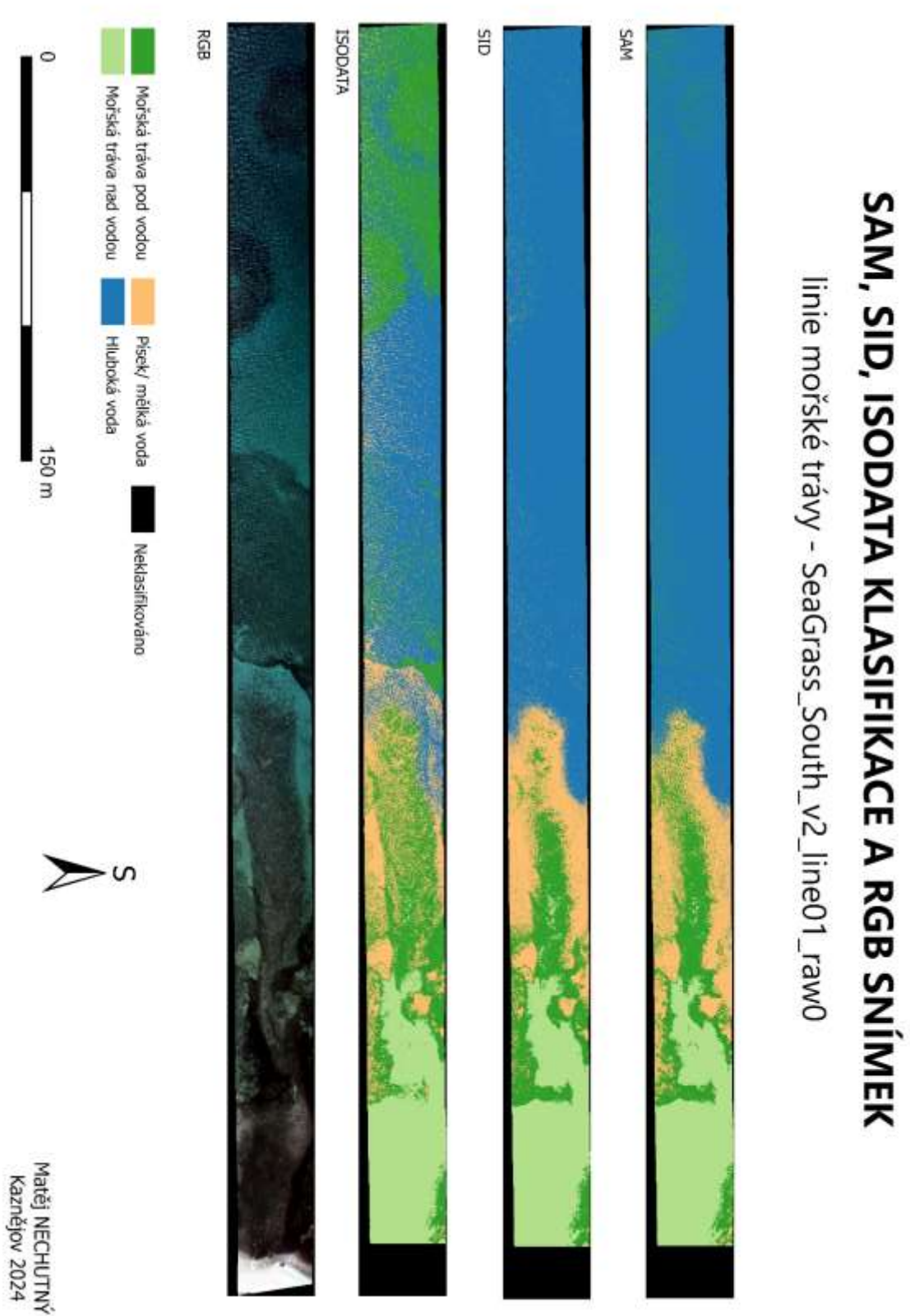
<https://www.epa.gov/coral-reefs/threats-coral-reefs>.

WORLD BANK (2020) World Bank Official Boundaries [cit. 30. 6. 2024]

<https://datacatalog.worldbank.org/search/dataset/0038272>.

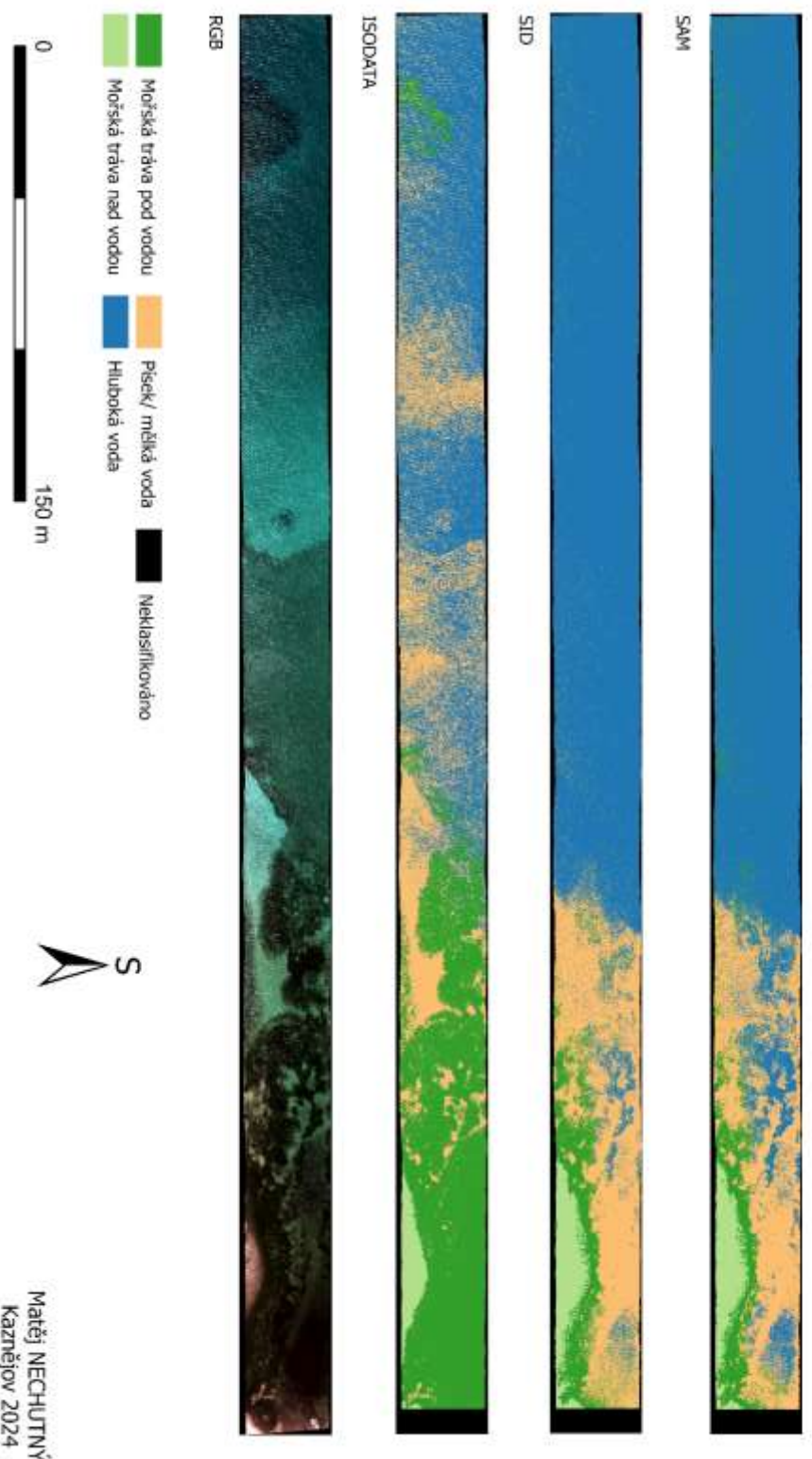
9 Přílohy

V příloze se nachází přehled všech vytvořených klasifikací pro dané lokality.



SAM, SID, ISODATA KLASIFIKACE A RGB SNÍMEK

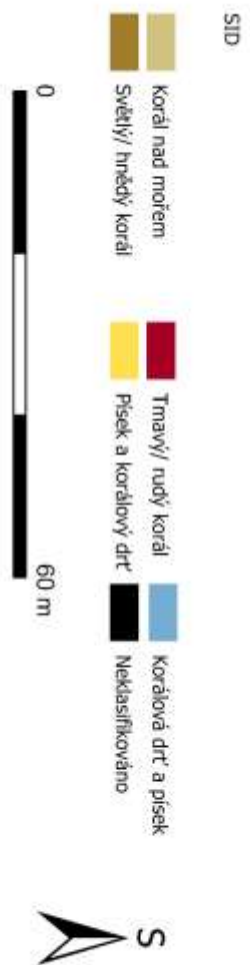
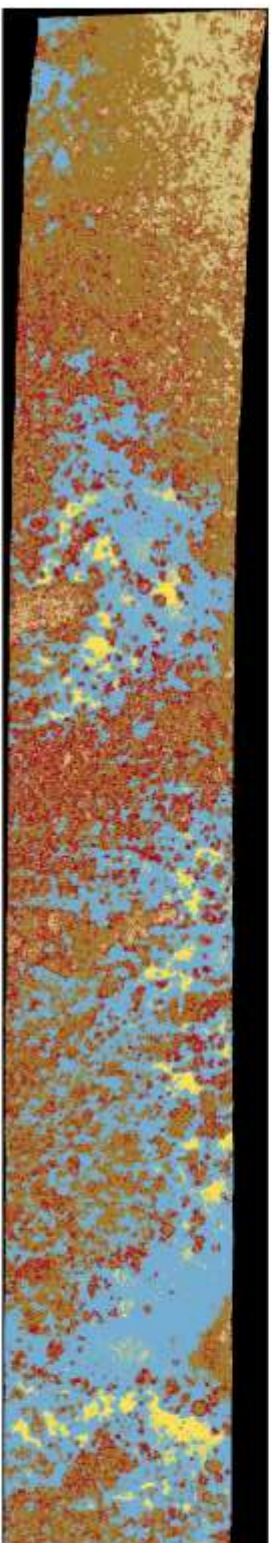
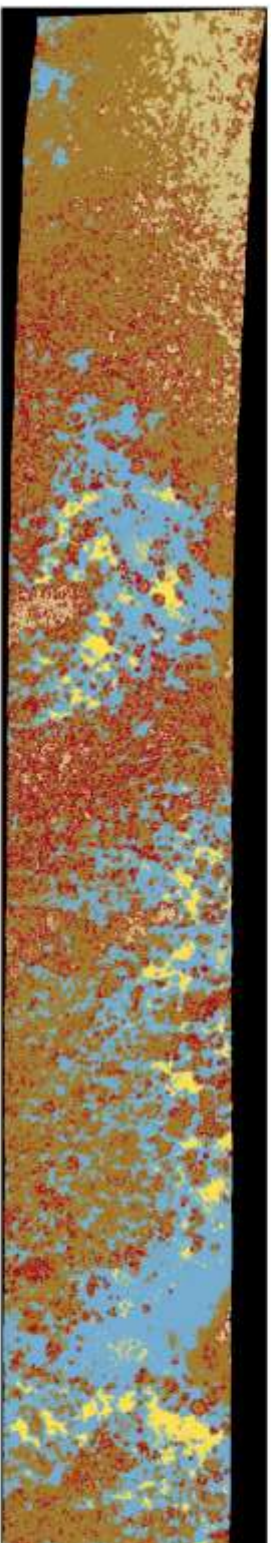
linie mořské tráv - SeaGrass_South_v2_line02_raw10528



Matěj NECHUTNÝ
Kaznějov 2024

SAM a SID KLASIFIKACE

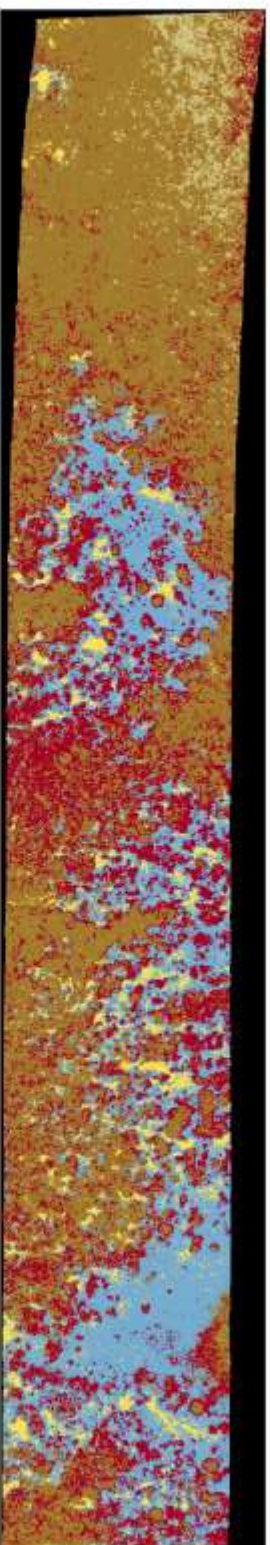
linie korálového útesu - F_Reef_line03_raw8912



Matěj NECHUTNÝ
Kaznějov 2024

ISODATA KLASIFIKACE A RGB SNÍMEK

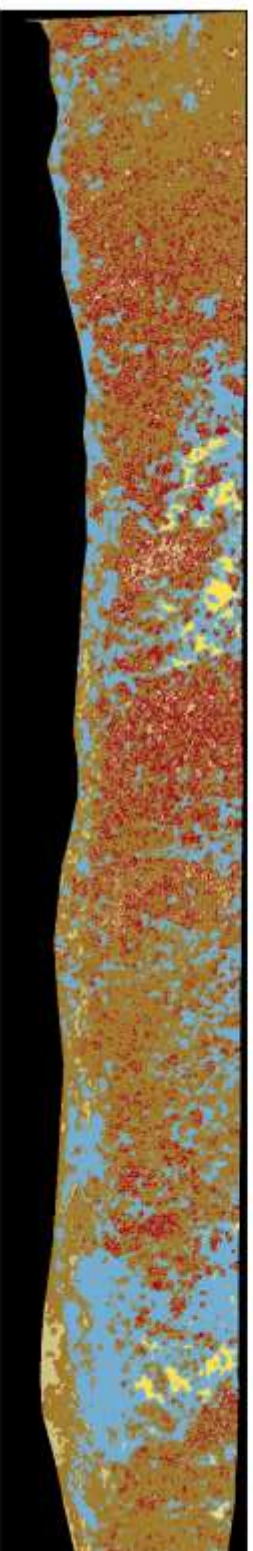
linie korálového útesu - F_Reef_line03_raw8912



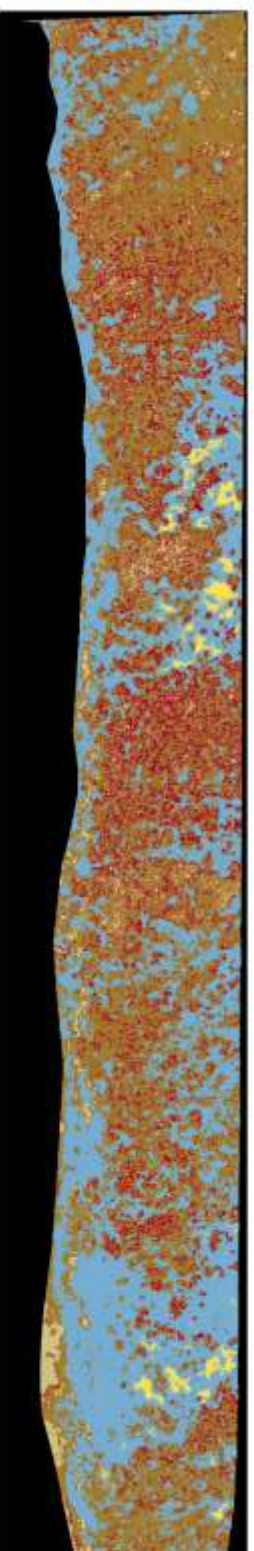
Matěj NECHUTNÝ
Kaznějov 2024

SAM a SID KLASIFIKACE

linie korálového útesu - F_Reef_line04_raw13328



SAM



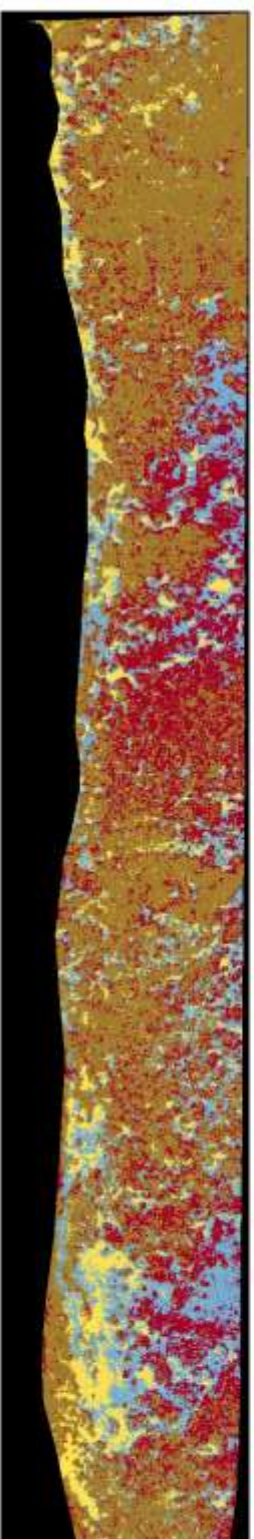
SID



Matěj NECHUTNÝ
Kaznějov 2024

ISODATA KLASIFIKACE A RGB SNÍMEK

linie korálového útesu - F_Reef_line04_raw13328



ISODATA



RGB



Matěj NECHUTNÝ
Kaznějov 2024

SAM, SID, ISODATA KLASIFIKACE A RGB SNÍMEK

linie korálové zahrádky - CoralGarden_line02garden_raw7920



SAM, SID, ISODATA KLASIFIKACE A RGB SNÍMEK

linie korálové zahrádky - CoralGarden_line01tam_raw0

