

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA PROSTOROVÝCH VĚD



**HODNOCENÍ PŘESNOSTI PRODUKTŮ PROJEKTŮ HARMONIZED LANDSAT
SENTINEL-2 A PLANETSCOPE SENTINEL-2 HARMONIZED DATA**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Bakalant: Ondřej Koubík

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Klouček, Ph.D.

2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Ondřej Koubík

Geografické informační systémy a dálkový průzkum Země v životním prostředí

Název práce

Hodnocení přesnosti produktů projektů Harmonized Landsat Sentinel-2 a PlanetScope Sentinel-2 harmonized data

Název anglicky

Accuracy assesment of Harmonized Landsat Sentinel-2 and PlanetScope Sentinel-2 harmonized data products

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je vyhodnotit přesnost/využitelnost harmonizovaných dat Sentinel-2 a Landsat 8, případně PlanetScope a Sentinel-2. Hodnocení bude provedeno na příkladu různých obrazových analýz (například vegetačních indexů apod.).

Dílní cíle práce souvisí s těmito výzkumnými otázkami:

- (a) Liší se hodnoty indexu NDVI spočtených na harmonizovaných a neharmonizovaných produktech?
- (b) Liší se index NDVI mezi jednotlivými typy krajinného pokryvu?
- (c) Je možné využít harmonizované produkty v analýzách využívajících časové řady družicových snímků?

Metodika

Rámcovou metodickou náplní bakalářské práce bude:

- (a) Získat vstupní harmonizovaná a neharmonizovaná satelitní data;
- (b) Pre-processing vstupních dat;
- (c) Vypočet vegetačního indexu NDVI;
- (d) Tvorba náhodných referenčních bodů;
- (e) Statistické porovnání výsledků (například RMSE, lineární regrese apod.);
- (f) Zodpovězení výše uvedených výzkumných otázek.

Doporučený rozsah práce

Cca 30 normovaných stran.

Klíčová slova

NDVI, družicové snímky, harmonizované produkty, krajinný pokryv, ArcGIS

Doporučené zdroje informací

- Claverie, M., Ju, J., Masek, J. G., Dungan, J. L., Vermote, E. F., Roger, J. C., ... & Justice, C. (2018). The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set. *Remote sensing of environment*, 219, 145-161.
- Frazier, A. E., & Hemingway, B. L. (2021). A technical review of planet smallsat data: Practical considerations for processing and using planetscope imagery. *Remote Sensing*, 13(19), 3930.
- Moon, M., Richardson, A. D., & Friedl, M. A. (2021). Multiscale assessment of land surface phenology from harmonized Landsat 8 and Sentinel-2, PlanetScope, and PhenoCam imagery. *Remote Sensing of Environment*, 266, 112716.
- Tomíček, J., Mišurec, J., Lukeš, P., & Potůčková, M. (2022). Retrieval of Harmonized LAI Product of Agricultural Crops from Landsat OLI and Sentinel-2 MSI Time Series. *Agriculture*, 12(12), 2080.
- Wulder, M. A., Hermosilla, T., White, J. C., Hobart, G., & Masek, J. G. (2021). Augmenting Landsat time series with Harmonized Landsat Sentinel-2 data products: Assessment of spectral correspondence. *Science of Remote Sensing*, 4, 100031.

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Tomáš Klouček, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra prostorových věd

Elektronicky schváleno dne 6. 3. 2024

prof. Ing. Petra Šimová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 7. 3. 2024

prof. RNDr. Michael Komárek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 09. 03. 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma:

Hodnocení přesnosti produktů projektů Harmonized Landsat Sentinel-2 a PlanetScope Sentinel-2 Harmonized Data vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Prohlašuji, že jsem nástroje AI využil v souladu s vnitřními předpisy univerzity a principy akademické integrity a etiky. Na využití těchto nástrojů v práci vhodným způsobem odkazuji.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne 27. 3. 2024

.....

Poděkování

Rád bych velice poděkoval vedoucímu práce Ing. Tomášovi Kloučkovi, Ph.D. za jeho velkou ochotu, rady a trpělivost při vedení méjí bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval mým rodičům, bratrům a přátelům za podporu během mého zpracování této bakalářské práce.

Abstrakt CZ

Tato bakalářská práce se zabývá hodnocením přesnosti produktů projektů Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS) a PlanetScope Sentinel-2 Harmonized Data. Hlavním cílem je posoudit využitelnost a přesnost harmonizovaných dat v aplikacích pro monitorování vegetace a změn využití půdy. Práce vychází z literární rešerše a praktické analýzy satelitních dat, které jsou doplněny statistickým vyhodnocením. Specificky se zaměřuje na srovnání hodnot Normalizovaného Diferenčního Vegetačního Indexu (NDVI) mezi harmonizovanými a neharmonizovanými daty a mezi různými typy krajinného pokryvu. Analýza ukázala, že v případě harmonizovaných dat PlanetScope/Sentinel-2 dosahuje hodnota RMSE (Root Mean Square Error) v prvním zájmovém území 0,062 a v druhém zájmovém území 0,036, zatímco pro HLS L30/Sentinel-2 je RMSE 0,173 v prvním zájmovém území a 0,528 v druhém zájmovém území. Pro HLS S30/Landsat-8 byly hodnoty RMSE v prvním zájmovém území 0,304 a v druhém zájmovém území 0,337. Tyto výsledky představují klíčové aspekty ovlivňující kvalitu a využitelnost harmonizovaných satelitních dat a přispívají k lepšímu porozumění možnostem jejich využití v časových řadách satelitních snímků. Hlavní přínos práce tedy spočívá v kvantifikaci přesnosti harmonizovaných dat, které představují cennou informaci, jak pro vědeckou komunitu, tak i aplikované uživatele v oblasti dálkového průzkumu Země.

Klíčová slova: harmonizovaná data, satelitní snímky, NDVI, vegetace, změny využití půdy

Abstrakt ENG

This bachelor's thesis addresses the evaluation of the accuracy of products from the Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS) and PlanetScope Sentinel-2 Harmonized Data projects. The main objective is to assess the usability and accuracy of harmonized data in applications for vegetation monitoring and changes in land use. The work is based on a literature review and practical analysis of satellite data, supplemented by statistical evaluation. Specifically, it focuses on comparing the values of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) between harmonized and non-harmonized data and among different types of land cover. The analysis revealed that for the PlanetScope/Sentinel-2 harmonized data, the RMSE (Root Mean Square Error) value reaches 0.062 in the first area of interest and 0.036 in the second area of interest, whereas for HLS L30/Sentinel-2, the RMSE is 0.173 in the first area of interest and 0.528 in the second area of interest. For HLS S30/Landsat-8, the RMSE values were 0.304 in the first area of interest and 0.337 in the second area of interest. These results represent key aspects affecting the quality and usability of harmonized satellite data and contribute to a better understanding of their application possibilities in time series of satellite images. Thus, the main contribution of the thesis lies in quantifying the accuracy of harmonized data, which presents valuable information for both the scientific community and applied users in the field of remote Earth sensing.

Key words: harmonized data, satellite images, NDVI, vegetation, land use changes

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Cíle práce	10
3. Literární rešerše	11
3.1. Projekt Harmonized Landsat Sentinel-2	11
3.1.1. Vstupní data	12
3.1.2. Zpracování dat HLS a spektrální pásma.....	13
3.1.3. Projekce a rozvržení dlaždic.....	15
3.1.4. Algoritmy.....	16
3.1.4.1. Korekce atmosférických vlivů	16
3.1.4.2. Normalizace úhlu pohledu a osvětlení	17
3.1.4.3. Úprava průchodnosti pásem.....	17
3.1.4.4. Prostorové převzorkování.....	18
3.1.5. Formáty produktů	19
3.2. Projekt PlanetScope.....	20
3.2.1. Vstupní data a spektrální pásma.....	21
3.2.2. Zpracování dat PlanetScope	22
3.2.3. Projekce a rozvržení dlaždic.....	23
3.2.4. Algoritmy.....	24
3.2.5. Formát souborů	25
3.3. Normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI).....	26
3.4. Esri Land Cover	27
4. Charakteristika studijních území	28
4.1. Central Valley (Kalifornie)	28
4.2. Chrudimská oblast (Česká republika).....	29
5. Metodika	30
5.1. Výběr zájmových území	30
5.2. Získání a pre-processing dat	30
5.3. Výpočet vegetačního indexu NDVI.....	34
5.4. Tvorba referenčních bodů a extrakce hodnot NDVI.....	34
5.5. Statistické porovnání výsledků	35
6. Současný stav řešené problematiky	36
7. Výsledky	37
8. Diskuse.....	42
9. Závěr a přínos práce	44
10. Přehled literatury a použitých zdrojů	45
11. Přílohy	48

Přehled použitých zkratek

HLS	Harmonized Landsat Sentinel
NDVI	Normalized difference vegetation index
PS	PlanetScope
OLI	Operational Land Imager
MSI	MultiSpectral Instrument
UTM	Univerzální transverzální Mercatorův systém souřadnic
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
MGRS	Military Grid Reference System
TOA	Top of the Atmosphere
LaSCR	Land Surface Reflectance Code
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
MODIS	Moderate resolution imaging spectroradiometer
GRI	Global reference image
AROP	Automated rRegistration and Orthorectification Package
GDAS	Global Data Assimilation system
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
RSR	Relative Spectral Response
ESA	European Space Agency
NASA	National Aeronautics and Space Administration
BOA	Bottom of Atmosphere
CA	Coastal Aerosol
DPZ	Dálkový průzkum Země
RMSE	Root Mean Square Error
GIS	Geografické informační systémy

SWIR	Short-wave infrared
TIRS	Thermal Infrared Sensor
QA	Quality assessment
NIR	Near-infrared
IQR	Interkvartilový rozsah

1. Úvod

V současné době představují satelitní data klíčový zdroj informací pro různé aplikace v oblastech, jako je monitorování zemědělství, změny klimatu, ochrana životního prostředí a mnoho dalších. Projekt Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS) a projekt PlanetScope Sentinel-2 Harmonized Data se zaměřují na zpřístupnění kvalitnějších a konzistentnějších dat prostřednictvím harmonizace satelitních snímků z různých zdrojů. Cílem harmonizace je překonat limity jednotlivých satelitních systémů tím, že se kombinují jejich přednosti, čímž se zlepšuje frekvence pozorování, prostorové rozlišení a spektrální pokrytí. To umožňuje uživatelům provádět přesnější a spolehlivější analýzy povrchu Země.

Přesná a konzistentní satelitní data jsou zásadní pro vývoj efektivních nástrojů monitorování a řízení zemědělské produkce, sledování změn využití půdy a ochrany přírodních zdrojů. Přestože výzkum v této oblasti dosáhl značného pokroku, stále existují určité mezery ve znalostech, zejména v oblasti přesnosti a využitelnosti harmonizovaných dat pro specifické aplikace. Například otázky spojené s rozdíly v hodnotách normalizovaného diferenčního vegetačního indexu (NDVI) mezi harmonizovanými a neharmonizovanými daty, nebo rozdíly v NDVI mezi různými typy krajinného pokryvu zůstávají otevřené. Dalším významným aspektem je možnost využití harmonizovaných produktů pro analýzy využívající časové řady satelitních snímků.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na vyhodnocení přesnosti a využitelnosti harmonizovaných dat z projektů HLS a PlanetScope v kontextu aplikací pro monitorování vegetace a změn využití půdy. Skrze literární rešerši, analýzu satelitních dat a statistické vyhodnocení přináší práce nový pohled na využití harmonizovaných datových produktů pro vědecké a aplikované účely. Z tohoto výzkumu logicky vyplynou cíle zaměřené na identifikaci klíčových faktorů ovlivňujících kvalitu a využitelnost harmonizovaných satelitních dat, což představuje cenný informační přínos nejen pro komunitu dálkového průzkumu Země, ale i jiné, nejen výzkumné obory.

2. Cíle práce

Cílem bakalářské práce je vyhodnotit přesnost/využitelnost harmonizovaných dat Sentinel-2 a Landsat 8, případně PlanetScope a Sentinel-2. Cílem práce je zpracování je zpracování harmonizovaných a neharmonizovaných dat pro porovnání indexu NDVI a následné statistické vyhodnocení. V rámci závěrečné práce bylo stanoveno několik výzkumných otázek:

- A. Liší se hodnoty indexu NDVI spočtených na harmonizovaných a neharmonizovaných produktech?
- B. Liší se index NDVI mezi jednotlivými typy krajinného pokryvu?
- C. Je možné využít harmonizované produkty v analýzách využívajících časové řady družicových snímků?

3. Literární rešerše

3.1. Projekt Harmonized Landsat Sentinel-2

Projekt HLS, vedený NASA, je zaměřen na spojení dat odrazivosti zemského povrchu ze dvou klíčových zdrojů: senzor OLI (Operational Land Imager) na satelitech Landsat 8/9 a MSI (MultiSpectral Instrument) na Sentinel-2A/B. Cílem je umožnit systematické a frekventované pozorování globálního povrchu Země s rozlišením 30 metrů, což představuje významný přínos pro průběžné sledování změn v přírodním prostředí. Popis sensorů OLI a MSI představuje tabulka 1 [1].

Klíčovým úkolem tohoto projektu je zajistit kompatibilitu a srovnatelnost mezi různými datovými sadami, což se dosahuje díky široké škále technik zahrnující ochranu proti znečištění dat mraky a jejich stíny, korekci vlivů atmosféry, přesné sladění polohových informací a sjednocení formátu datových sad. Zásadní je také aplikace technik pro úpravu podle modelu Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) a zajištění souladu spektrálních charakteristik napříč různými snímacími systémy [1].

Projekt poskytuje dva základní typy obrazových dat, L30 a S30, získaných z Landsat 8/9 a Sentinel-2, které umožňují detailní pozorování jakéhokoli místa s vysokou aktualizací frekvencí. Pro S30 se uplatňuje BRDF korekce pro standardizaci odrazových charakteristik a zpřesnění dat do mřížky UTM (Universal Transverse Mercator coordinate system) a systému MGRS (Military Grid Reference System). L30 data procházejí podobným procesem úprav, aby byla zajištěna jejich vzájemná srovnatelnost a konzistence s produkty S30. Veškeré vstupy jsou uchovány ve formátu GeoTIFF optimalizovaném pro cloudové služby, což zjednodušuje manipulaci a analýzu dat [1].

	Landsat 8/OLI-TIRS	Sentinel-2A/MSI	Sentinel-2B/MSI
Launch date	February 11, 2013	June 23, 2015	March 7, 2017
Equatorial crossing time	10:00 a.m.	10:30 a.m.	10:30 a.m.
Spatial resolution	30 m (OLI) / 100 m (TIRS)	10 m / 20 m / 60 m (see spectral bands)	
Swath / Field of view	180 km / 15°	290 km / 20.6°	
Spectral bands (central wavelength)	Ultra blue	443 nm	443 nm (60 m)
	Visible	482 nm, 561 nm, 655 nm	490 nm (10 m), 560 nm (10 m), 665 nm (10m)
	Red edge	-	705 nm (20 m), 740 nm (20 m), 783 nm (20 m)
	NIR	865 nm	842 nm (10 m), 865 nm (20 m)
	SWIR	1609 nm, 2201 nm	1610 nm (20 m), 2190 nm (20 m)
	Cirrus	1373 nm	1375 nm (60 m)
	Water Vapor	-	945 nm (60 m)
	Thermal	10.9 μm, 12 μm	-

Tabulka 1: Charakteristiky Landsat-8 a Sentinel-2. Tabulka převzata z [1].

3.1.1. Vstupní data

Družice Landsat 8 a 9 je vybavena senzorem OLI. Tento senzor, obíhající Zemi ve výšce 705 km v dráze, která je synchronizovaná se sluncem, umožňuje pravidelné a široké pokrytí zemského povrchu díky svému zornému úhlu a šestnáctidennímu opakovacímu cyklu. OLI poskytuje snímky v devíti spektrálních pásmech a je schopen zachytávat obrazová data z rozsáhlé oblasti o šířce 185 kilometrů [2].

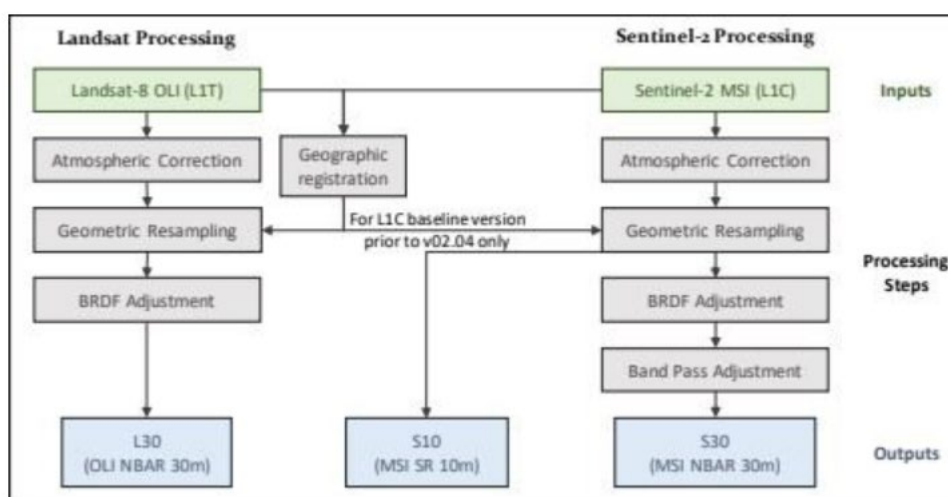
Kromě OLI je na těchto satelitech také tepelný infračervený senzor (z angl. Thermal Infrared Sensor; TIRS), který rozšiřuje schopnosti pozorování tím, že přináší data ve dvou tepelných pásmech. Ačkoliv má TIRS v základu rozlišení 100 metrů, pro účely distribuce a analýzy jsou jeho data převedena na rozlišení 30 metrů, což zajistí konzistentnost a umožní lepší integraci s daty z OLI. Projekt HLS zpracovává data z vrcholu atmosféry (z angl. Top of the Atmosphere; TOA) z Landsat 8/9 s geolokační přesností a s chybou RMSE nepřesahující 12 metrů pro přímá i zpětně zpracovaná data kategorie Tier-1 (data která splňují vysoké standardy geolokační přesnosti) [2].

Družice Sentinel-2A a 2B jsou vybaveny senzorem MSI, který se nachází ve výšce 786 km na dráze synchronizované se sluncem. Tento senzor má schopnost snímkovat Zemi s pravidelností každých pět dní, a díky svému rozsáhlému zornému úhlu 20.6 stupňů zaznamenává oblasti o šířce až 290 kilometrů. Senzor MSI je charakteristický svým variabilním rozlišením, které se mění podle spektrálního pásma: pro oblasti viditelného světla a blízkého infračerveného spektra dosahuje 10 metrů, pro vybrané červené a blízká infračervená pásma a pásma krátkovlnného infračerveného spektra 20 metrů, zatímco pro pásma sledující atmosférické složky je rozlišení 60 metrů. Data získaná tímto senzorem na úrovni TOA Level-1C jsou klíčová pro projekt HLS [3].

3.1.2. Zpracování dat HLS a spektrální pásma

Projekt HLS zahrnuje komplexní proces zpracování dat, jehož cílem je minimalizovat rozdíly v odrazivosti povrchu způsobené rozmanitostí použitých měřicích zařízení. V rámci tohoto procesu se data získaná z družic Landsat 8/9 a Sentinel-2 podrobují specifickým radiometrickým a geometrickým úpravám. Tyto kroky zahrnují korekce pro sjednocení dat z různých zdrojů, přičemž se bere v úvahu rozdílné chování odrazu světla od povrchu (BRDF) a specifika spektrálních pásem. Schéma algoritmického procesu se nachází na obrázku 1 [4].

Výstupem projektu jsou tři hlavní typy produktů: S10, které představují atmosféricky korigované snímky ze Sentinel-2 v jejich původním rozlišení a geometrii, a dva harmonizované produkty – S30 a L30. Tyto jsou standardizovány na jednotné rozlišení 30 metrů a adaptovány do UTM základu s využitím dlaždicového systému Sentinel-2. Zatímco produkty S10 běžně nejsou uchovávány v archivu, produkty S30 a L30 jsou převzorkovány pro konzistenci rozlišení a organizovány podle mřížky vojenského referenčního systému (MGRS) pro snadnou identifikaci a analýzu [4].



Obrázek 1: Schéma algoritmického procesu HLS. Obrázek převzat z [4]

Veškerá spektrální pásma Landsat 8/9 a Sentinel-2 jsou po procesu harmonizace zachována. Spektrální pásma se nacházejí v tabulce 2.

Band name	OLI band number	MSI band number	HLS band code name L8	HLS band code name S2	Wavelength (micrometers)
Coastal Aerosol	1	1	B01	B01	0,43 – 0,45
Blue	2	2	B02	B02	0,45 – 0,51
Green	3	3	B03	B03	0,53 - 0,59
Red	4	4	B04	B04	0,64 – 0,67
Red-Edge 1	-	5	-	B05	0,69 – 0,71
Red-Edge 2	-	6	-	B06	0,73 – 0,75
Red-Edge 3	-	7	-	B07	0,77 – 0,79
NIR broad	-	8	-	B08	0,78 – 0,88
Nir Narrow	5	8A	B05	B8A	0,85 – 0,88
SWIR 1	6	11	B06	B11	0,85 – 0,88
SWIR 2	7	12	B07	B12	1,57 – 1,65
Water vapor	-	9	-	B09	2,11 – 2,29
Cirrus	9	10	B09	B10	0,93 – 0,95
Thermal Infrared 1	10	-	B10	-	1,36 – 1,38
Thermal infrared 2	11	-	B11	-	11,50 – 12,51

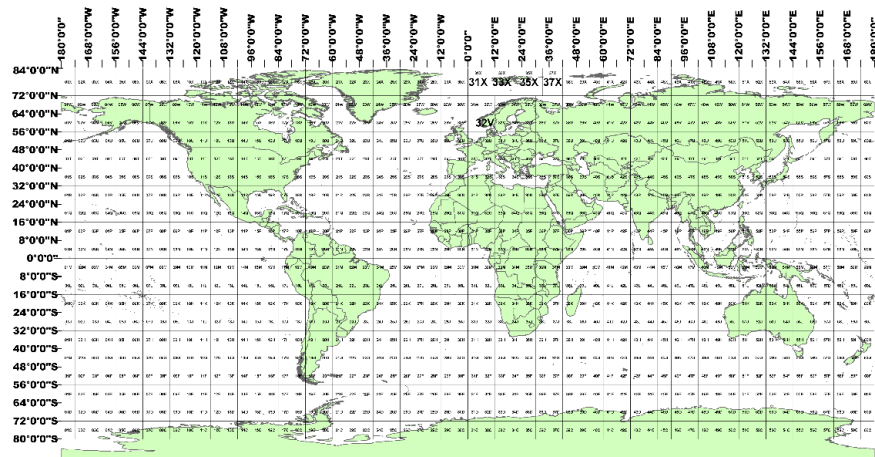
Tabulka 2: Spektrální pásma HLS. Tabulka převzata z [4].

3.1.3. Projekce a rozvržení dlaždic

V projektu HLS byl přijat systém organizace prostorových dat podle vzoru používaného Evropskou vesmírnou agenturou (z angl. European Space Agency; ESA) pro satelitní misi Sentinel-2. Tento systém vychází z adaptace Vojenského referenčního systému (MGRS) založeného na projekci UTM. Dělí zemský povrch do 60 zón dle zeměpisné délky, s každou zónou rozčleněnou do pásů širokých 8 stupňů počínaje rovníkem. Rozdělení MGRS systému se nachází na obrázku 2 [5].

Specificky pro Sentinel-2, každá část tohoto systému, či "buňka", s rozsahem $6^\circ \times 8^\circ$, je dále rozdělena na standardizované kvadranty o rozměrech přibližně 109,8 km na každou stranu. Tyto kvadranty, nebo "dlaždice", jsou navrženy tak, aby mezi nimi existoval překryv, činící zhruba 4900 metrů v rámci téže UTM zóny, a zajišťující větší překryv na hranicích mezi jednotlivými UTM zónami pro zlepšení kontinuity dat [5].

Identifikace každé dlaždice, například "12SUJ", vychází z její polohy v tomto systému, kde první dvě číslice a následné písmeno označují příslušnou UTM zónu a zeměpisnou šířku, zatímco poslední dvě písmena určují specifickou polohu dlaždice v rámci dané $6^\circ \times 8^\circ$ buňky. Tento organizovaný a jednotný přístup umožňuje efektivní manipulaci a analýzu prostorových dat z obou satelitních systémů [5].



Obrázek 2: Vojenský referenční systém (MGRS). Obrázek převzat z [5]

3.1.4. Algoritmy

3.1.4.1. Korekce atmosférických vlivů

V rámci projektu HLS se korekce atmosférických vlivů na odrazivost provádí prostřednictvím algoritmu Land Surface Reflectance Code (LaSRC). Tento algoritmus je základem pro modelování odrazu světla, přičemž zahrnuje aspekty absorpce světla atmosférickými plyny a jeho rozptylu molekulami a aerosoly. Zásadní je zde využití dat o obsahu ozónu, vodní páry a odhadu optické tloušťky aerosolů, přičemž se vychází z modelů GDAS (Global Data Assimilation System), dat MODIS (Moderate resolution imaging spectroradiometer) a analýzy poměrů intenzity odrazu ve vybraných spektrálních pásmech. Díky těmto informacím lze dosáhnout přesné korekce efektů atmosféry [6].

Detekce oblaků a jejich stínů je nezbytná pro práci s časovými řadami satelitních snímků. U produktu L30 se využívá systém detekce od LaSRC, zatímco u Sentinel-2 se setkáváme s problémy kvůli absenci termálního infračerveného pásma, což komplikuje přesnou detekci. Existují různé metody pro Sentinel-2 jako je upravený Fmask [6].

Pro Landsat 8 a jeho OLI senzor se v rámci LaSRC používá maska oblaků založená na specifických prahových hodnotách, jasové teplotě a analýze odrazivosti v různých pásmech. Dále se pro detekci stínů oblaků využívá geometrické modelování a empirické pozorování [6].

Fmask, automatizovaný algoritmus pro detekci oblaků, stínů a sněhu, původně vyvinutý pro data Landsat, je nyní přizpůsoben tak, aby mohl fungovat bez termálních dat, což umožňuje jeho využití i pro Sentinel-2 tedy i produkt S30. Tato adaptace, zahrnující analýzu prahových hodnot odrazivosti a geometrie slunečního pozorovacího úhlu, poskytuje robustní nástroj pro korekci atmosférických vlivů v různých typech satelitních snímků [6].

3.1.4.2. Normalizace úhlu pohledu a osvětlení

V projektu HLS je jedním z klíčových kroků přizpůsobení odrazivosti z dat Landsat 8/9 a Sentinel-2 tak, aby se zohlednily rozdíly ve směru pohledu a osvětlení. K tomuto účelu se využívá metoda c-faktoru, která standardizuje úhel pohledu na nadir (přímý svislý pohled) pro všechny pixely a určuje úhel osvětlení jako průměrný solární zenitový úhel pro střed dané oblasti v čase přeletů Landsat 8/9 a Sentinel-2 [6].

Normalizace odrazivosti pomocí Bidirectional Reflectance Distribution Function modelu využívá BRDF koeficienty získané z ročního cyklu globálních dat MODIS s rozlišením 500 metrů. Tyto koeficienty jsou aplikovány na spektrální pásma OLI a MSI, přičemž pro pásma MSI, která nemají přímý ekvivalent v MODIS, se používají interpolované koeficienty. BRDF efekt, závislý na úhlu pozorování a pozici Slunce, je korigován s ohledem na časový rozdíl mezi přelety Landsat 8/9 a Sentinel-2 a na proměnlivost zenitového úhlu Slunce v průběhu dne a mezi jednotlivými pruhy snímku [6].

Tento přístup umožňuje efektivně sjednotit data z různých satelitů tím, že zohledňuje a koriguje rozdíly v pozorovacích podmínkách, což vede k věrohodnější a srovnatelnější interpretaci odrazivosti povrchu v rámci projektu HLS [6].

3.1.4.3. Úprava průchodnosti pásem

Z jednou z výzev, která se řeší v HLS je sjednocení spektrálních charakteristik mezi multispektrálním senzorem MSI a OLI, které mají pro stejná spektrální pásma rozdílné průchodnosti. Aby bylo možné data efektivně kombinovat a analyzovat, je nutné tyto rozdíly vyrovnat [6].

Proces úpravy spočívá ve využití charakteristik OLI jako referenčního standardu, ke kterému se přizpůsobují data z MSI. Toto přizpůsobení se provádí lineárním přizpůsobením mezi odpovídajícími spektrálními

pásmy obou senzorů, vycházející z koeficientů získaných analýzou 500 hyperspektrálních snímků ze satelitu Hyperion. Tato analýza zahrnovala scény rozložené po celém světě a výsledky byly použity k vytvoření syntetických odpovídajících spektrálních pásem pro oba senzory [6].

Pro senzor MSI byly specificky využity charakteristiky relativní spektrální odezvy (RSR), přičemž byly brány v úvahu i drobné rozdíly mezi senzory na palubách Sentinel-2A a Sentinel-2B. Bylo předpokládáno, že RSR pro určitá spektrální pásma, jako je CA (Coastal Aerosol) a modré pásma, jsou mezi oběma satelity shodné [6].

3.1.4.4. Prostorové převzorkování

Projekt HLS při zpracování dat z Landsat 8/9 a Sentinel-2 využívá specifické metody prostorového převzorkování, aby zajistil konzistentní geoprostorovou přesnost a usnadnil kombinaci dat z obou zdrojů [1].

Pro data L30 se aplikuje metoda kubické konvoluce, která výrazně zlepšuje geolokaci díky vyspělým datovým sadám Landsat 8/9 Collection-2, eliminující potřebu časové ko-registrace. Aby bylo možné dosáhnout souladu s dlaždicemi MGRS, používanými u Sentinel-2, je třeba provést prostorové převzorkování Landsat 8/9 dat. Tento krok řeší odlišnosti v registraci dat mezi ESA (která se zaměřuje na rohy pixelů) a USGS (která se zaměřuje na střed pixelů) a zahrnuje reprojekci a převzorkování dat v případě rozdílných UTM zón [1].

Pro tvorbu S30 se používá metoda jednoduchého váženého průměru, která přizpůsobuje menší originální pixely požadované velikosti 30 metrů. Tato technika zohledňuje rozdílné rozlišení původních pixelů a jejich integraci do větších jednotek [1].

Převzorkování kvalitativních QA (Quality assessment) vrstev se řídí pravidlem „přítomnosti“, kde každý výstupní pixel odráží přítomnost jakýchkoli indikovaných problémů v jakémkoli z jeho vstupních pixelů. Toto pravidlo, uplatněné jak pro L30, tak S30, umožňuje identifikovat a indikovat různé stavy, jako jsou oblaky, stíny oblaků nebo vodní plochy [1].

3.1.5. Formáty produktů

Projekt HLS poskytuje svá data ve formátu Cloud Optimized GeoTIFF, což umožňuje efektivní práci s obrazovými daty v cloudových aplikacích. Každá datová vrstva je dostupná jako samostatný soubor, což uživatelům usnadňuje stahování pouze těch datových vrstev, které potřebují. Soubory jsou navíc interně komprimovány pro snížení objemu dat [1].

Datové sady L30 jsou uspořádány do adresářů, jejichž názvy reflektují lokaci (dlaždicí), datum a přesný čas sběru. Tyto adresáře obsahují soubory pro každé spektrální pásmo, masku oblaků, Fmask, metadata, kontrolní součty, náhledové obrázky a soubory popisující úhly osvětlení a pozorování. Názvy souborů a adresářů, obsahující UTC čas, slouží primárně k identifikaci datové sady, ne k detailním časovým analýzám, jelikož čas ve středu scény nemusí přesně odpovídat času snímání nad konkrétní dlaždicí po jejím zarovnání do systému MGRS [1].

Data S30 jsou strukturovaná obdobně a stejný formát názvů souborů zde slouží k rozlišení času začátku snímání osvětlené části Země senzorem. Toto je zvláště užitečné pro rozlišení mezi snímky pořízenými ve stejný den ve vysokých zeměpisných šířkách [1].

3.2. Projekt PlanetScope

PlanetScope od společnosti Planet Labs představuje klíčový krok k zajištění konzistentnosti dat pozorování Země. Satelitní konstelace PlanetScope obsahuje satelity, které mají rozdílné spektrální charakteristiky. Aby bylo možné data z různých generací těchto satelitů porovnávat, je nutné provést normalizaci a harmonizaci. Data odrazivosti povrchu zaznamenaná těmito satelity se navíc mohou lišit kvůli atmosférickým vlivům a rozptylu světla, které nejsou automaticky korigovány, a metody korekce mohou selhávat za nízkých slunečních úhlů či v nepříznivých podmínkách [8].

Snímky z PlanetScope jsou pořizovány jako spojitý sled snímků, označovaných jako "scény", pocházejících z různých generací satelitů. Tyto snímky jsou po harmonizaci a normalizaci kompatibilní s daty Sentinel-2 [8].

Harmonizační nástroj na úrovni scén efektivně snižuje rozdíly mezi jednotlivými scénami a generacemi satelitů, přičemž zachovává dobré radiometrické vlastnosti a zajišťuje kompatibilitu s daty Sentinel-2. Díky tomu je možné data odrazivosti povrchu interpretovat konzistentně, umožňuje uživatelům zkoumat jednotlivé pixely v čase a zpracovávat data odrazivosti povrchu s vysokou frekvencí, jako by pocházela z jednotného zdroje [7].

3.2.1. Vstupní data a spektrální pásma

PlanetScope, tvořený flotilou malých satelitů Dove, obíhajících ve výšce přibližně 500 kilometrů na sluneční synchronní dráze, poskytuje rozsáhlé snímkování zemského povrchu. Díky schopnosti pořizovat obrazy s šířkou záběru až 120 kilometrů a s častými přelety, jsou tyto satelity klíčové pro získávání dat s vysokým rozlišením, která nacházejí uplatnění v širokém spektru oblastí [9].

Multispektrální senzory na satelitech Dove zaznamenávají zemský povrch ve čtyřech základních spektrálních pásmech: modrém, zeleném, červeném a blízkém infračerveném (NIR). Tyto senzory nabízí rozlišení až 3 metry na pixel, což umožňuje precizní monitorování a rozbor lokálních změn na Zemi. Novější modely satelitů Dove přinášejí přidávají další spektrální pásma, což zlepšuje možnosti analýzy a interpretace dat. Tato vylepšení umožňují lepší rozlišení různých typů vegetace, vodních ploch a dalších povrchových charakteristik. Spektrální pásma satelitů PlanetScope se nachází v tabulce 3 [8].

Zpracovaná data jsou dostupná v analytickém a vizuálním formátu, včetně geopravených hodnot odrazivosti povrchu uložených ve formátu GeoTIFF, a jsou doplněna o obsáhlou sadu metadat ve formátu GeoJSON. Tato metadata obsahují důležité informace jako čas snímání, úhel slunečního svitu a další, což umožňuje snadnou integraci dat do různých nástrojů pro geoprostorovou analýzu a dálkový průzkum Země [7].

Band name	PS2 band number	PS2.SD Band number	PSB.SD Band number	Wavelength (micrometres)
Coastal Blue	-	-	1	0,455-0,515
Blue	1	1	2	0,465-0,515
Green I	-	-	3	0,513-0,549
Green	2	2	4	0,547-0,583
Yellow	-	-	5	0,600-0,620
Red	3	3	6	0,650-0,680
Red-Edge	-	-	7	0,697-0,713
NIR	4	4	8	0,845-0,885

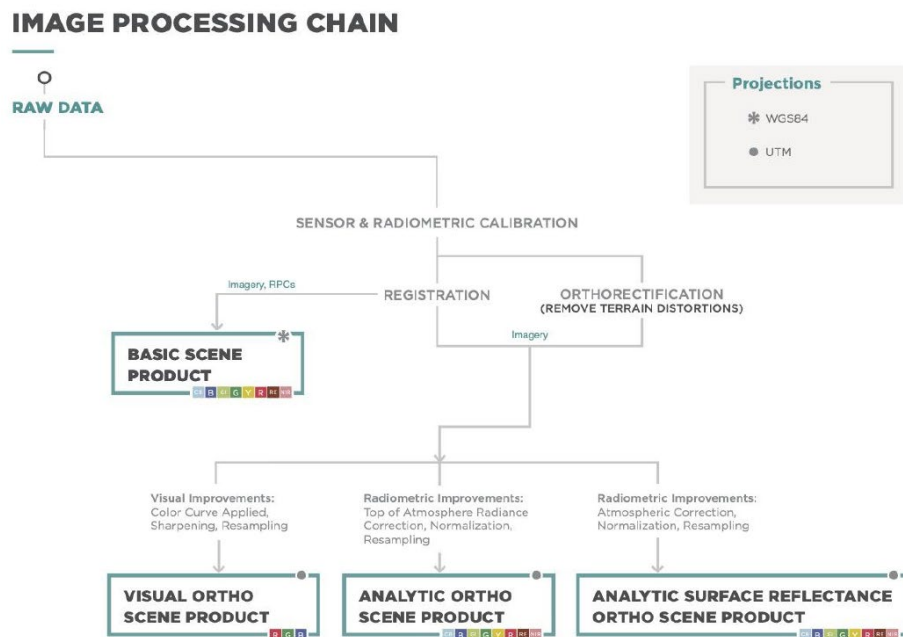
Tabulka 3: Spektrální pásma satelitů PlanetScope

3.2.2. Zpracování dat PlanetScope

Projekt PlanetScope provádí komplexní zpracování snímků pořízených satelity Dove, zahrnující klíčové kroky jako radiometrické a geometrické úpravy, aby byly odstraněny nesrovnalosti vznikající z rozdílů mezi různými generacemi těchto satelitů. S využitím atmosférického korekčního modelu, který se opírá o radiativní přenosový model 6S a doplňková data z MODIS, projekt řeší atmosférické zkreslení a zajistí jednotnost dat, což je klíčové pro zachování jejich přesnosti. Proces zpracování snímků pořízených satelity Dove lze vidět na obrázku 3 [7].

Harmonizace a normalizace dat jsou zásadní pro zajištění srovnatelnosti časových řad s daty z jiných zdrojů, jako je Sentinel-2, což umožňuje PlanetScope zachovat kontinuitu a konzistenci datových sad. Tyto procesy umožňují převod dat z různých spektrálních rozlišovacích úrovní na standardizované formáty, podobně jako jsou produkty S10 a S30 od Sentinel-2, pokrývající spektrum zpracování od úrovně L1B (radiance na vrcholu atmosféry) až po L3B (geometricky a atmosféricky upravená data odrazivosti povrchu) [8].

Geometrické korekce, které zahrnují přizpůsobení pro terénní nerovnosti a úhly snímání, jsou prováděny s vysokou přesností, což umožňuje přesné geopozicování snímků. Díky organizaci dat v systému, který je kompatibilní s UTM používanou u Sentinel-2, je snadná integrace a srovnání dat PlanetScope s dalšími satelitními zdroji [8].



Obrázek 3: Schéma zpracování snímků PlanetScope. Obrázek převzat z [8].

3.2.3. Projekce a rozvržení dlaždic

PlanetScope používá pro organizaci svých snímků mřížkový systém, který zajišťuje systematické a jednotné pokrytí povrchu Země. Ačkoli tento systém není postaven na standardním dlaždicovém modelu, jaký mají například HLS nebo Sentinel-2, lze data PlanetScope přizpůsobit tak, aby byla kompatibilní s mřížkovými systémy využívanými v rámci rozsáhlejších satelitních iniciativ [9].

PlanetScope pro řízení a distribuci svých snímků využívá specifický systém rozdělení založený na geografických oblastech nebo na specifických požadavcích klientů. Každý snímek je opatřen unikátním identifikátorem reflektujícím jeho polohu a čas pořízení, což uživatelům usnadňuje organizaci a vyhledávání relevantních dat [9].

I když to není explicitně uvedeno, je možné, že Planet Labs nabízí v rámci svého API nástroje pro konverzi snímků do systému UTM nebo jiných mřížkových systémů. Tím by se umožnilo srovnávání a integrace dat PlanetScope s daty z jiných zdrojů, jako jsou Sentinel-2 nebo Landsat [9].

Planet Labs rovněž poskytuje nástroje umožňující konverzi geografických koordinací na identifikátory, které se vztahují ke specifickým snímkům. To ulehčuje uživatelům výběr a objednávku snímků pro jejich oblasti zájmu. Pro praktické využití dat je klíčové, aby byla data z různých satelitních systémů vzájemně kompatibilní a snadno použitelná v různých aplikacích a projektech [9].

3.2.4. Algoritmy

Projekt PlanetScope, stejně jako projekt HLS, stojí na pokročilých algoritmičeských základech, které zajišťují vysokou kvalitu a konzistenci dat. V jádru obou projektů leží sofistikované techniky zpracování, které umožňují překonat různé výzvy spojené se sběrem satelitních dat [7].

V projektu PlanetScope se využívají metody, které se snaží eliminovat atmosférické rušení a odstraňují vizuální šum způsobený oblaky a jejich stíny, což zvyšuje čistotu a přesnost dat. Přestože podoba algoritmů se může mezi oběma projekty mírně lišit, cíl je stejný: dosáhnout co nejpřesnější reprezentace pozorovaného terénu [7].

Další klíčovou součástí je optimalizace úhlu pohledu a intenzity osvětlení, díky čemuž jsou snímky srovnatelné bez ohledu na časové období nebo specifické podmínky při pořízení. Tato úprava je nezbytná pro udržení konzistence a kvality časových řad dat. Projekt také zahrnuje přizpůsobení průchodnosti pásem, které minimalizuje rozdíly v senzorové odezvě a zajišťuje, že analýza vegetace a dalších charakteristik povrchu je co nejpřesnější [8].

3.2.5. Formát souborů

Data z PlanetScope jsou dostupná ve formátu GeoTIFF, což je standardní formát optimalizovaný pro GIS a další platformy pro DPZ. Formát GeoTIFF je navržen tak, aby umožňoval snadnou integraci s různými softwarovými řešeními a poskytoval flexibilitu při manipulaci s daty, včetně možnosti práce s daty v cloudových službách. Uživatelé mají možnost stahovat data z PlanetScope v různých spektrálních pásmech a na různých úrovních zpracování, což zahrnuje širokou škálu produktů, jako jsou ortomosaiky, analytické produkty a produkty speciálně připravené pro použití v aplikacích využívajících strojové učení [8].

3.3. Normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI)

Normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI) je klíčovým ukazatelem v DPZ, který se používá k hodnocení vegetace na povrchu Země. Jeho význam spočívá ve schopnosti kvantifikovat vegetační pokryv a monitorovat jeho změny v čase. NDVI využívá rozdíl mezi odraženým blízkým infračerveným (NIR) a viditelným červeným světlem (VIS) od vegetace, aby poskytl číselný ukazatel zdraví a hustoty vegetace [10].

Index NDVI se vypočítá pomocí vzorce:

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{NIR} - \text{Red})}{(\text{NIR} + \text{Red})}$$

Obrázek 4: Vzorec pro výpočet NDVI. Obrázek převzat z [11].

Koncept NDVI byl vyvinut v raných 70. letech 20. století a od té doby se stal nedílnou součástí DPZ. Díky schopnosti NDVI zachytit a kvantifikovat vegetační pokryv získali vědci a odborníci cenná nástroj pro monitorování a analýzu vegetace na globální úrovni. První významné aplikace NDVI se objevily v roce 1973 s vypuštěním satelitů série Landsat, které umožnily výpočet NDVI na velké škále [10].

NDVI nachází široké uplatnění v řadě oblastí, od zemědělství a lesnictví až po monitorování změn využití půdy. Index se rovněž osvědčil jako dobrý identifikátor sucha, protože vegetace omezená vodou vykazuje nižší relativní hodnoty NDVI a hustotu vegetace [12].

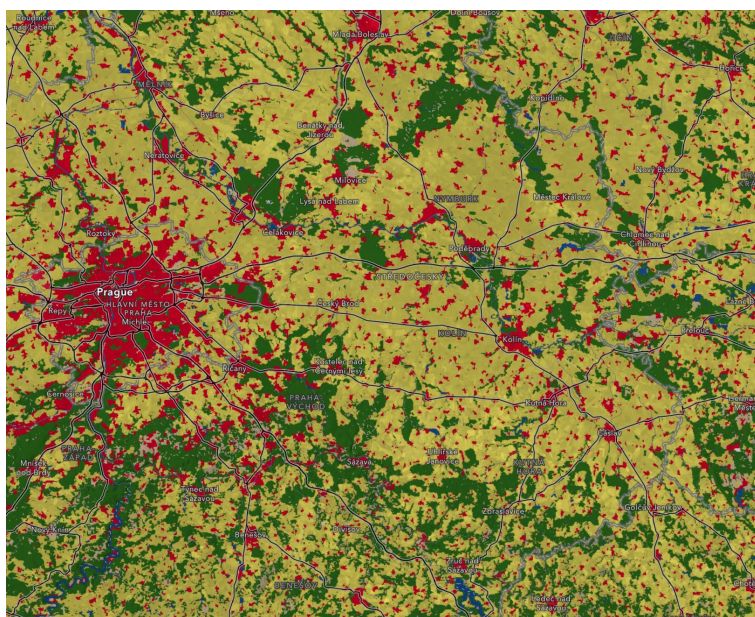
NDVI je vypočítáván jako poměr mezi odraženým NIR a červeným světlem, což umožňuje odhadnout množství a zdraví vegetace. Hodnoty NDVI se pohybují od -1 do 1, kde vyšší hodnoty odpovídají hustší a zdravější vegetaci [13].

3.4. Esri Land Cover

Databáze globálního krajinného pokrytí Země Esri Land Cover z roku 2017 představuje významný pokrok v oblasti DPZ a GIS, umožňující přesnější, aktuálnější a dostupnější mapování zemského povrchu. Tento projekt byl vyvinut ve spolupráci se společnostmi Impact Observatory a Microsoft a využívá vysoké rozlišení satelitních snímků Sentinel-2 a nový pracovní postup strojového učení k vytvoření detailní a každoročně aktualizované globální mapy pokrytí země [14].

Databáze je navržena tak, aby podporovala širokou škálu aplikací, od klimatických akcí a udržitelného využívání půdy pro správu zdrojů a urbanistické plánování. Je volně dostupná prostřednictvím webové aplikace Esri ArcGis Living Atlas of the World, čímž poskytuje více než 10 milionům uživatelů kvalitní geografická data. Začlenění umělé inteligence a hlubokého učení výrazně snížilo čas potřebný k vytvoření databáze, což umožňuje její aktualizaci na každoroční bázi a nabízí možnost klasifikace krajinného pokryvu země na vyžádání [15], [16].

Databáze rozlišuje deset různých kategorií krajinného pokryvu, včetně vodních ploch, lesních porostů, pastviny, zaplavené vegetace, zemědělských plochy, křovin, zastavěných oblastí, holé půdy, sněhu/ledu a oblaků (neklasifikované oblasti).



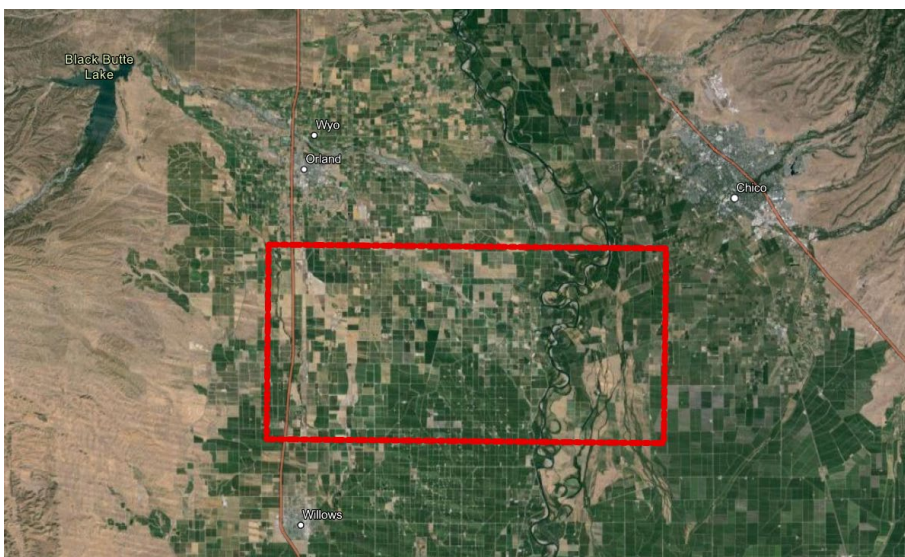
Obrázek 5: Příklad mapy Esri Land Cover (Praha a její okolí).

4. Charakteristika studijních území

4.1. Central Valley (Kalifornie)

První studijní oblast této práce je údolí Central Valley, umístěné ve Spojených státech amerických, konkrétně ve státě Kalifornie. Toto údolí, rozkládající se na rovinaté ploše s průměrnou nadmořskou výškou mezi 10 a 100 metry, pokrývá celkovou plochu přibližně $47\,000\text{ km}^2$. V oblasti se nachází významná města jako Sacramento, Fresno, Bakersfield a Redding, spolu s řadou menších obcí a rozsáhlými zemědělskými areály, zahrnujícím přibližně $28\,300\text{ km}^2$. Údolí je ohraničeno Pobřežními horami na západě a Sierrou Nevadou na východě. Díky své poloze a podmínkám je údolí Central Valley považováno za klíčové zemědělské centrum USA, poskytující více než polovinu produkce ovoce, zeleniny a ořechů v celé zemi [17].

Z geologického hlediska je údolí charakterizováno sedimentárním podložím, skládajícím se z usazenin z okolních horských řetězců a aluviálních nánosů. Klimatické podmínky údolí se pohybují mezi středomořským a polopouštním klimatem, což se odráží ve výrazných rozdílech v úhrnu srážek mezi jeho severní a jižní částí. Půdy jsou zde tvořeny aluviálními nánosy, s dominancí úrodných černozemí. Zájmové území (Obr. 6), na kterém byla prováděna analýza se nachází v severní části údolí a primárně se využívá pro pěstování zemědělských plodin [17].

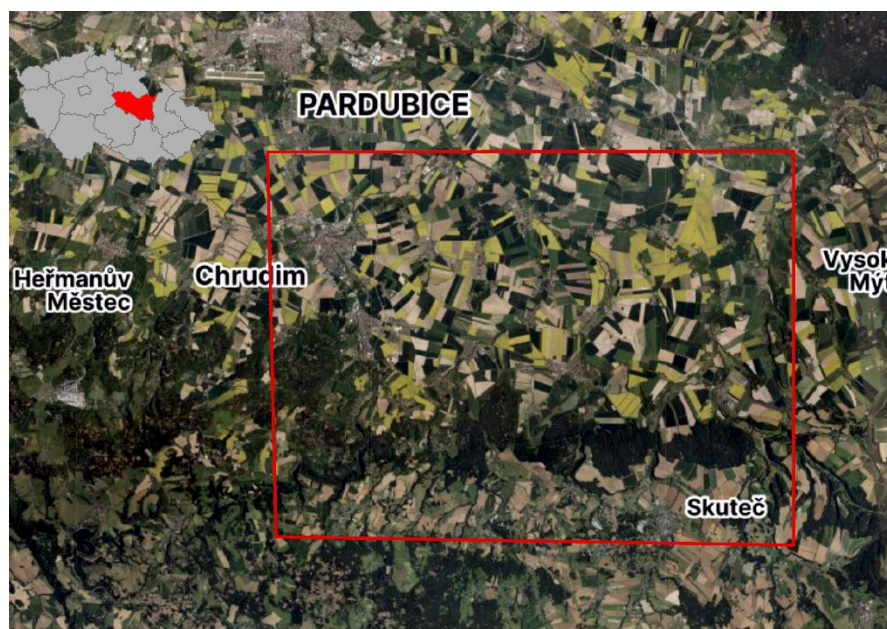


Obrázek 6: Hranice první zájmové lokality, kde probíhal výzkum.

4.2. Chrudimská oblast (Česká republika)

Druhou studijní oblastí této práce je Chrudimská oblast, nacházející se ve východní části Čech, konkrétně v Pardubickém kraji (Obr. 7). Chrudimská oblast je součástí rozsáhlejší geografické a přírodní jednotky zvané železné hory, která je charakteristická svým mírně zvlněným terénem a výškovými rozdíly, s průměrnou nadmořskou výškou mezi 200 a 300 metry nad mořem. Území je různorodé a zahrnuje jak urbanizované plochy – město Chrudim a okolní obce, tak i širokou škálu přírodních krajín, včetně lesů, luk, pastvin a polí [18].

Geologicky je oblast definována převážně sedimentárními horninami z paleozoika a mezozoika, které se vyznačují různorodostí minerálního složení. Klima v regionu je typicky mírné, s rovnoměrným rozdělením srážek po celý rok. Půdy v této oblasti jsou proměnlivé, s vysokým podílem hnědozemí a černozemí, což je indikátor dobrých podmínek pro zemědělství [19].



Obrázek 7: Hranice druhé zájmové lokality, kde probíhal výzkum.

5. Metodika

Metodickou náplň této práce lze shrnout do pěti na sebe navazujících částí. První praktickou částí byl výběr zájmových území. Následovalo získání a pre-processing satelitních dat a dat krajinného pokryvu. Na toto navázal výpočet normalizovaného diferenčního vegetačního indexu. Poté následovalo vytvoření referenčních bodů a extrakce hodnot NDVI. Na závěr bylo provedeno statistické vyhodnocení dosažených výsledků a zodpovězení předem stanovených otázek.

5.1. Výběr zájmových území

V rámci této práce byla pozornost zaměřena na dvě lokality s významným zemědělským zaměřením. První lokalitou je Central Valley v Kalifornii, USA, která je známá jako jeden z nejproduktivnějších zemědělských regionů světa díky svému aridnímu klimatu. Druhou lokalitou je oblast v okolí města Chrudim v Pardubickém kraji, ČR, která reprezentuje tradiční evropské zemědělství s mírným klimatem.

5.2. Získání a pre-processing dat

Pro analýzu každého zvoleného území bylo získáno celkem pět satelitních snímků. Tyto snímky byly staženy z několika zdrojů, konkrétně z portálů NASA Earthdata, Planet Explorer, USGS EarthExplorer a Copernicus, a to ve formě různých produktů, které se liší svým zaměřením a úrovní zpracování [20], [21], [22], [23].

Konkrétně, snímky z programu Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS) byly získány ve dvou variantách: produkt L30, který je dostupný pod názvem „HLS Landsat Operational Imager Surface Reflectance and TOA Brightness Daily Global 30m v2.0“, a produkt S30, dostupný jako „HLS Sentinel-2 Multi-spectral Instrument Surface Reflectance Daily Global 30m v2.0“. Tyto snímky byly pořízeny dne 28.7.2023 a 28.7.2023 pro první území (identifikátory

snímků HLS.L30.T10SEJ.202306T184452.v2.0 a HLS.S30.T10SEJ.2023209 T184921.v2.0) a dne 8.7.2023 a 9.7.2023 pro druhé území (HLS.L30.T33UWR.2023189T094422.v2.0 a HLS.S30.T33UWR.2023190T100031.v2.0).

Dále byly z portálu Planet Explorer staženy snímky z programu PlanetScope v harmonizované variantě. Proces stažení zahrnoval výběr snímků, nastavení parametrů objednávky, výběr počtu spektrálních pásem a rozhodnutí o dalším zpracování, jako je harmonizace se snímky Sentinel-2 nebo vytvoření kompozitu. Tyto snímky byly pořízeny dne 25.7.2023 pro první území a 9.7.2023 pro druhé území.

Snímky z programu Landsat 8 byly získány z portálu USGS Earth Explorer, a to v úrovni zpracování „Landsat Collection 2 Level 2, Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2“ což zahrnuje korekci atmosférických vlivů a poskytuje data o odrazivosti povrchu a teplotě. Datum pořízení těchto snímků bylo 25.7.2023 pro první území (s identifikátorem LC08_L2SP_044033_20230725_20230802_02_T1) a 9.7.2023 pro druhé území (identifikátor LC08_L2SP_190025_20230711_02_T1).

Následně byl z portálu Copernicus získán snímek Sentinel-2 v úrovni zpracování L2A, což znamená, že data prošla atmosférickou korekcí. Tyto snímky byly pořízeny dne 28.7.2023 pro první území (S2A_MSIL2A_20230728T184921_N0509_R113_T10SEJ_20230728T235554.SAFE) a 9.7.2023 pro druhé území (S2A_MSIL2A_20230709T100031_N0509_R122_T33UWR_20230709T135148.SAFE). Přehled všech použitých vstupních dat se nachází v tabulce 4.

Nakonec k již získaným satelitním datům byla pro doplnění a podporu analýzy každého zvoleného území přidána také data pokrytí země od ESRI. Tato data, známá jako Esri Land Cover, poskytují podrobné informace o typu zemského

povrchu, včetně vegetace, vodních ploch, urbanizovaných oblastí a dalších typů pokrytí [24].

V první fázi předzpracování byl použit software SNAP (Sentinel Application Platform) ke zpracování snímků získaných z Landsat 8 a Sentinel-2. Hlavním úkolem v této fázi byla konverze původních datových formátů těchto snímků do formátu GeoTIFF. Konverze byla provedena pomocí nástroje „Convert Datatype“ v SNAP, což umožnilo transformaci dat do formátu, který je vhodnější pro další zpracování a analýzu.

Po úspěšné konverzi dat byla veškerá satelitní data a land cover data importována do softwaru ArcGIS Pro. V ArcGIS Pro bylo nezbytné provést další kroky předzpracování, zejména pro produkty Harmonized Landsat Sentinel-2. Tyto produkty vyžadovaly sloučení jednotlivých spektrálních kanálů do jediného multispektrálního snímku, což bylo realizováno pomocí funkce „Composite bands“. Tento proces je klíčový pro vytvoření komplexního obrazu, který obsahuje celé spektrum dostupných spektrálních informací, a umožňuje tak hlubší analýzu fenoménů na zemském povrchu.

Posledním krokem v procesu předzpracování bylo přizpůsobení rozsahu satelitních snímků a land cover dat specifickému zájmovému území. Tento úkol byl proveden pomocí funkce „Clip Raster“, která umožňuje precizní oříznutí snímků podle definovaného geografického obvodu. Tímto způsobem byla data efektivně omezena na oblast výzkumu, což minimalizuje velikost datové sady a zvyšuje efektivitu následné analýzy tím, že se zaměřuje pouze na relevantní oblast.

Zdroj	Produkt	Datum pořízení (První území / Druhé území)
HLS	L30	28.7.2023 / 8.7.2023
HLS	S30	28.7.2023 / 9.7.2023
PlanetScope	Harmonized	25.7.2023 / 9.7.2023
Landsat	Collection 2 Level 2 (Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2)	25.7.2023 / 9.7.2023
Sentinel-2	L2A TOA	28.7.2023 / 9.7.2023

Tabulka 4: Použitá vstupní data

5.3. Výpočet vegetačního indexu NDVI

Pro výpočet indexu NDVI satelitních snímků byla využita funkce dostupná v sekci „Imagery“ pod názvem „Indices“, kde byl specificky vybrán index NDVI. Tato funkce umožňuje automatizovaný výpočet NDVI pro různé typy satelitních snímků, přičemž klíčovým krokem byl správný výběr spektrálních pásem pro každý konkrétní snímek.

Pro správné provedení výpočtu je nezbytné zvolit odpovídající NIR (Near Infrared) a červené spektrální pásmo, která se liší v závislosti na charakteristikách konkrétního satelitního snímku.

5.4. Tvorba referenčních bodů a extrakce hodnot NDVI

Za účelem získání hodnot NDVI byla v první kroku použita funkce „Create Random Points“, díky které bylo pro zájmové území generováno 1000 náhodně rozmístěných bodů. Tento přístup umožňuje pokrýt celé území a získat širokou škálu hodnot NDVI.

V dalším kroku byla stejná metoda aplikovaná pro generování 200 referenčních bodů pro každý identifikovatelný typ krajinného pokryvu v zájmovém území. Mezi tyto typy pokryvu patří: zastavěná plocha (Built Area), stromy (Trees), vodní plochy (Water), zemědělské plodiny (Crops), holá půda (Bare Ground) a pastviny (Rangeland).

Pro extrakci NDVI hodnot z náhodně vytvořených bodů byla použita funkce „Extract Multi Values to Points“. Před spuštěním této funkce bylo nezbytné vybrat vstupní bodovou vrstvu, což v prvním případě byla sada 1000 náhodně vytvořených bodů, a následně specifikovat všechny rastry obsahující NDVI data. Pro data krajinného pokrytí (Land Cover) byla tato funkce použita individuálně pro každý typ pokryvu, což umožnilo přesné přiřazení hodnot k jednotlivým bodům v závislosti na jejich krajinném pokryvu.

5.5. Statistické porovnání výsledků

Tato část byla zaměřena na analýzu NDVI hodnot, konkrétně na porovnání mezi harmonizovanými a neharmonizovanými satelitními produkty a následné hodnocení průměrných NDVI hodnot pro různé typy krajinného pokryvu.

Pro statistické vyhodnocení byly využity různé metody a nástroje, včetně tabulek pro sumarizaci dat, krabicových grafů pro zobrazení rozptylu hodnot, sloupcových grafů pro srovnání mezi kategoriemi krajinného pokryvu, lineární regrese pro odhalení vzájemných vztahů a výpočet střední kvadratické odchylky/chyby RMSE (Root-mean-square deviation) pro posouzení přesnosti dat. Vzorec pro výpočet RMSE lze vidět na obrázku 8.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - x_0)^2}.$$

Obrázek 8: Vzorec pro výpočet RMSE. Obrázek převzat z [25]

6. Současný stav řešené problematiky

Výzkum v oblasti využití harmonizovaných družicových dat se zaměřuje na vývoj nových metod a technik ke zlepšení porozumění a řízení zemědělských a přírodních zdrojů. Výzkumná práce v této oblasti je věnována různým aspektům:

- Vývoj nových algoritmů pro efektivní integraci dat z různých satelitních systémů, jako jsou Landsat a Sentinel, s cílem minimalizovat rozdíly ve spektrálních charakteristikách a maximalizovat užitečnost kombinovaných dat [26].
- Zlepšení metod pro zvýšení rozlišení a přesnosti dat, což umožňuje detailnější monitorování změn na zemském povrchu [26].
- Vývoj metod pro vyrovnání časové a prostorové korelace mezi daty získanými z různých satelitů [26].
- Výzkum optimálních metod pro volbu a kombinaci dat z různých satelitních senzorů v závislosti na konkrétních aplikacích, jako je monitorování lesních ekosystémů a zemědělských plodin [27].

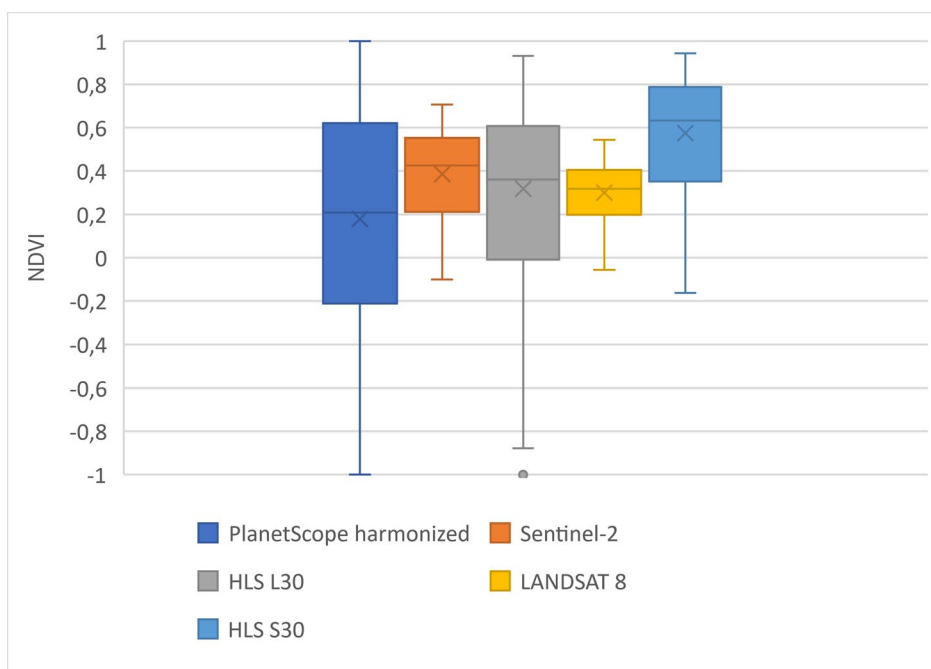
Existuje široká škála technik pro zpracování a analýzu harmonizovaných družicových dat, z nichž každá má své specifické výhody a aplikace. Důležitým faktorem při výběru metody je nejen typ dostupných satelitních dat, ale také požadovaný výsledek a důvod použití. Autoři jako Wulder et al. [26] a Tomíček et al. [27] doporučují, aby při výběru metody byly brány v úvahu faktory jako spektrální rozlišení, časová koherence a citlivost na atmosférické jevy.

Publikace Wuldera et al. [26] demonstruje význam harmonizace dat pro zlepšení monitorování lesních ekosystémů, zatímco práce Tomíčka et al. [27] zdůrazňuje potenciál harmonizovaných dat pro výpočet indexu listové plochy v zemědělství. Tyto studie poskytují důležitý přehled o současném stavu výzkumu v oblasti využití harmonizovaných satelitních dat a naznačují směry dalšího vývoje a aplikace v praxi.

7. Výsledky

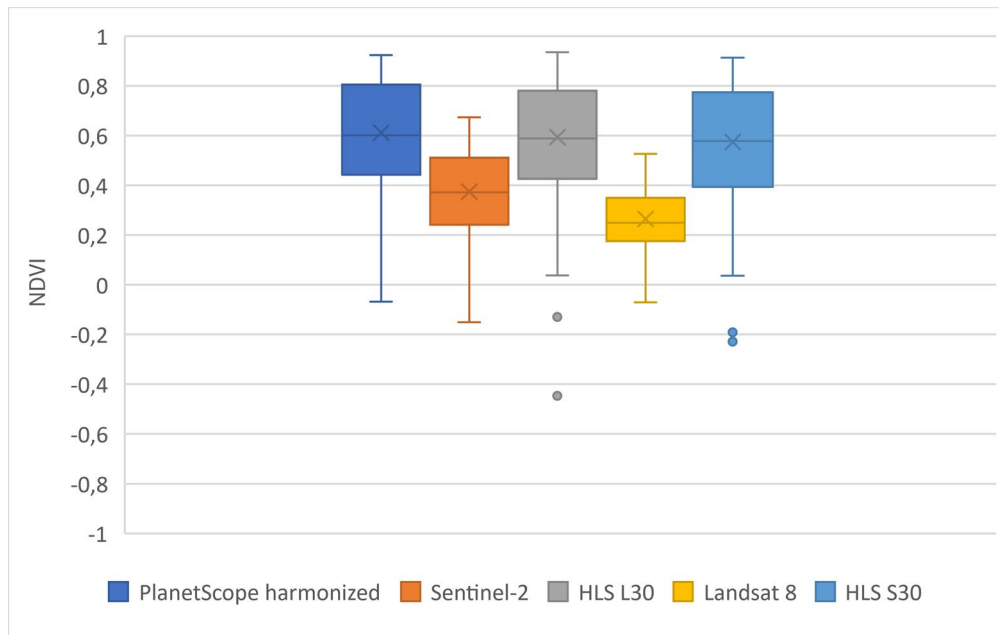
Z výsledků práce je zřejmé, že harmonizovaná a neharmonizovaná data se od sebe liší, nicméně rozdíly nejsou obvykle příliš velké, což značí, že harmonizovaná data jsou stále relativně blízka datům neharmonizovaným a lze je tedy využít pro většinu aplikací. V box-plotech na Obr. 9 a Obr. 10, jsou vizualizovány základní rozdíly NDVI v jednotlivých datových produktech. Každý tento box-plot se skládá ze čtyř linií, které znázorňují různé hodnoty: první kvartil představuje spodní hrana boxu, třetí kvartil představuje horní hrana boxu, čára uvnitř boxu představuje medián a čáry mimo box (whiskery) znázorňují rozsah a extrém dat. Hodnoty NDVI použité v box-plotech se nachází v příloze (Tabulka 1 a 2).

V prvním území (Central Valley) má nejširší rozsah mezikvartilové rozpětí IQR (Interquartile Range) a zahrnuje nejvíce negativních hodnot NDVI harmonizovaný PlanetScope. Sentinel-2, HLS L30 a HLS S30 mají vyšší mediány než PlanetScope. Landsat 8 zase vykazuje nižší maximální hodnoty a menší IQR.



Obr. 9: Box-ploty ukazující rozdíl hodnot NDVI harmonizovaných a neharmonizovaných produktů v prvním území.

V druhém území (Chrudimská oblast) má PlanetScope podobné rozložení NDVI jako na prvním území, ale s mírně vyšším mediánem. Sentinel-2 a HLS S30 vykazují nižší minimální hodnoty a vyšší maximální hodnoty než na prvním území. HLS L30 a Landsat 8 mají nižší maximální hodnoty než na prvním území, což může naznačovat rozdíly ve vegetační pokrývce nebo v detekci mezi územími.



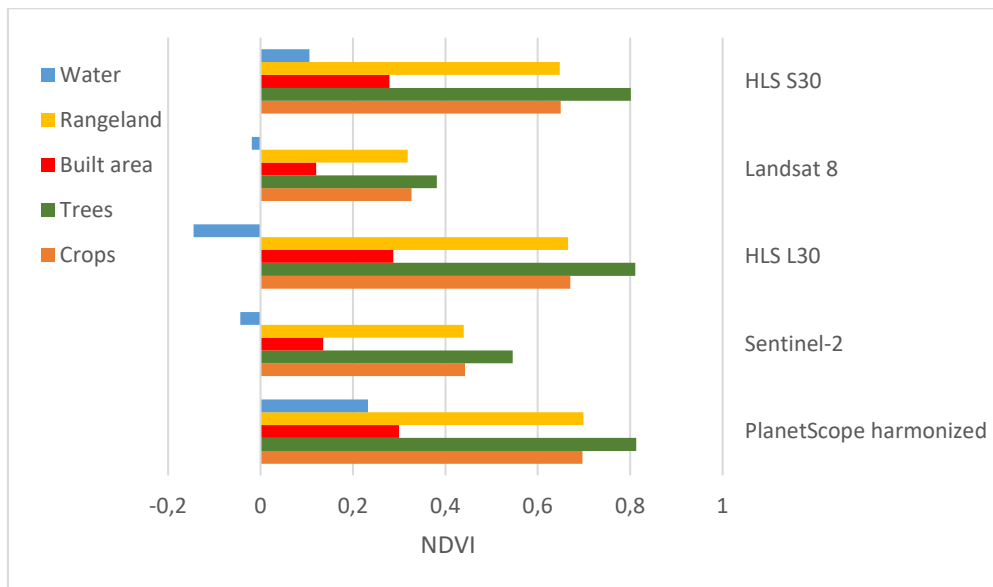
Obr. 10: Box-ploty ukazující rozdíl hodnot NDVI harmonizovaných a neharmonizovaných produktů v druhém území.

Ve sloupcových grafech na Obr. 11 a Obr. 12 jsou vizualizovány průměrné hodnoty NDVI pro jednotlivé typy krajinného pokryvu a pro každý zdroj dat.

Satelitní zdroje obsahují 5 sloupců, kde každý představuje jiný typ krajinného pokryvu. Žlutý sloupec představuje Rangeland (pastviny), červený sloupec představuje Built Area (Zastavěná oblast), modrý sloupec představuje Water (voda), zelený sloupec představuje Trees (Stromy/Lesy) a oranžový sloupec představuje Crops (plodiny/zemědělskou plochu). Tabulka s průměrnými hodnotami se nachází v příloze v kapitole 11 (Tabulka 3 a 4).



Obrázek 11: Průměrné hodnoty NDVI v prvním zájmovém území pro různé typy krajinného pokryvu.



Obrázek 12: Průměrné hodnoty NDVI v druhém zájmovém území pro různé typy krajinného pokryvu.

Ze sloupcových grafů lze vidět, že harmonizace funguje lépe pro typy krajinného pokryvu jako jsou lesy a plodiny, kde jsou průměrné hodnoty NDVI konzistentnější a vyšší. Vodní plochy představují pro harmonizaci problém, neboť se zde objevují

výraznější rozdíly mezi různými satelitními zdroji, což může být způsobeno specifickými charakteristikami těchto typů pokryvu a limitacemi harmonizačních metod pro jejich zpracování.

Výsledky vizuální interpretace potvrdilo následné statistické vyhodnocení pomocí metody lineární regrese a RMSE porovnávající NDVI z harmonizovaného zdroje a jeho neharmonizovaného protějšku.

Analýza lineární regrese, jak je prezentováno v tabulkách 5 a 6 pomocí koeficientu determinace R^2 , odhalila míru korelace mezi harmonizovanými a neharmonizovanými hodnotami NDVI. Pro PlanetScope/Sentinel-2 dosáhla determinace R^2 hodnoty 0,86 což značí vysokou korelaci mezi těmito dvěma satelity. Pro HLS L30/Sentinel-2 dosáhla determinace hodnoty 0,88 v prvním území a 0,83 v druhém území. Rozdíl mezi těmito hodnotami je v podstatě minimální, tudíž lze pořád říct, že jde o vysokou korelaci. Pro HLS S30/Landsat 8 determinace dosáhla v prvním území hodnoty 0,87 a v druhém území 0,71. V tomto případě je rozdíl již značně vyšší než u předchozích dat, ale pořád se jedná o relativně vysokou korelaci. Veškeré grafy znázorňující lineární regrese se nacházejí v příloze v kapitole 11 (Obrázky 1, 2, 3, 4, 5, 6).

PlanetScope/Sentinel-2	HLS L30/Sentinel-2	HLS S30/Landsat 8
$R^2 = 0,86$	$R^2 = 0,88$	$R^2 = 0,87$

Tabulka 5: Tabulka výsledků lineární regrese pro první zájmové území z hodnot NDVI harmonizovaných snímku a jeho neharmonizovaných protějšků.

PlanetScope/Sentinel-2	HLS L30/Sentinel-2	HLS S30/Landsat 8
$R^2 = 0,86$	$R^2 = 0,83$	$R^2 = 0,71$

Tabulka 6: Tabulka výsledků lineární regrese pro druhé zájmové území z hodnot NDVI harmonizovaných snímku a jeho neharmonizovaných protějšků.

V případě RMSE bylo stejně jako za pomoci regrese zjištěno, že v harmonizovaných a neharmonizovaných datech se chyba pohybuje v relativně nízkých hodnotách. Hodnoty vypočtené chyby RMSE se pro první území nachází v tabulce 7 a pro druhé území v tabulce 8. V případě PlanetScope/Sentinel-2 chyba RMSE vyšla v prvním území 0,062 a v druhém území 0,036. Takto nízké hodnoty signalizují velmi úzkou shodu mezi harmonizovanými a neharmonizovanými NDVI hodnotami. Pro HLS L30/Sentinel-2 vyšla hodnota RMSE v prvním území 0,173 a v druhém území 0,52. V tomto případě jsou zde již vyšší odchylky, na které může mít vliv rozlišení, spektrální zpracování nebo také prostředí. Pro HLS S30/Landsat 8 vyšla v prvním území chyba v hodnotě 0,3 a ve druhém území 0,33. V tomto případě jsou obě hodnoty srovnatelné ale naznačují také mírné zvýšení chyby. Tyto výsledky poukazují na to, že i když RMSE může být vyšší pro určité kombinace dat, obecně lze harmonizovaná data považovat za přesná a spolehlivá.

PlanetScope/Sentinel-2	HLS L30/Sentinel-2	HLS S30/Landsat 8
<i>RMSE = 0,06219231712</i>	<i>RMSE = 0,1733597864</i>	<i>RMSE = 0,303866291</i>

Tabulka 7: Tabulka vypočtených RMSE hodnot pro první zájmové území za pomoci hodnot NDVI vypočtených harmonizovaných snímků a jejich neharmonizovaných protějšků.

PlanetScope/Sentinel-2	HLS L30/Sentinel-2	HLS S30/Landsat 8
<i>RMSE = 0,035756806</i>	<i>RMSE = 0,527651329</i>	<i>RMSE = 0,337064401</i>

Tabulka 8: Tabulka vypočtených RMSE hodnot pro druhé zájmové území za pomoci hodnot NDVI vypočtených harmonizovaných snímků a jejich neharmonizovaných protějšků.

8. Diskuse

Diskuse k výsledkům mé práce a porovnání s poznatky získanými ve studii Nguyen a kol. [28], zdůrazňuje klíčovou roli harmonizace dat obdržených ze satelitního dálkového průzkumu pro efektivní monitorování zemědělských oblastí. Má analýza ukázala, že harmonizovaná data jsou výrazně konzistentní s původními, neharmonizovanými daty, což naznačuje minimální rozdíly mezi oběma sadami. Tento výsledek je v souladu s důrazem, který Nguyen a kol. [28] kladou na harmonizaci pro přesné zaznamenávání změn v plodinách, zejména v suchem ohrožených oblastech. Zatímco Nguyen a kol. [28], se zaměřují především na detaily předzpracování dat, jako jsou atmosférické korekce a topografické úpravy, má studie přináší srovnání hodnot NDVI získaných z různých zdrojů, ukazující, že dosažení datové konzistence je neoddelitelně spojeno s procesem harmonizace.

Moje srovnání NDVI hodnot z různých satelitních datových sad (PlanetScope, Sentinel-2, Landsat 8) a jejich porovnání s hodnotami získanými ve studii Nguyen a kol. [28] potvrzují, že harmonizace hraje nezbytnou úlohu v minimalizaci nesrovnalostí. Hodnoty determinačního koeficientu R^2 z mé lineární regresní analýzy, pohybující se mezi 0,71 a 0,88, znamenají vysokou míru shody mezi harmonizovanými a neharmonizovanými daty, což potvrzuje závěry Nguyen a kol. [28] o udržení vysoké korelace po procesu harmonizace.

Zajímavé rozdíly v přesnosti harmonizovaných dat PlanetScope/Sentinel-2 ve srovnání s kombinacemi Sentinel/Landsat mohou být způsobeny několika faktory. Zaprvé, PlanetScope a Sentinel-2 mají podobnější spektrální charakteristiky a rozlišení, což usnadňuje jejich přímou harmonizaci a minimalizuje spektrální rozdíly. To je v kontrastu s kombinacemi Sentinel/Landsat, kde rozdíly ve spektrálním rozsahu a prostorovém rozlišení mezi těmito platformami mohou komplikovat proces harmonizace. Dále, PlanetScope poskytuje vysoké prostorové rozlišení a vyšší frekvenci snímkování, což umožňuje detailnější monitorování krajinného pokryvu a změn v krajině. To může vést k větší citlivosti na změny NDVI, což se projeví lepšími hodnotami RMSE a R^2 ve srovnání s Landsat, který má nižší frekvenci snímkování a větší prostorové rozlišení. Také ale záleží na metodě použité pro předzpracování a harmonizaci dat.

Rozvoj technologií, jako je Google Earth Engine, použitý v práci Nguyen a kol. [28], nabízí nové možnosti pro další výzkum. Využití těchto nástrojů pro masové zpracování dat, včetně implementace algoritmů strojového učení, by mohlo výrazně zvýšit přesnost klasifikace a monitorování v reálném čase.

Zvláštní pozornost je také třeba věnovat rozdílům v environmentálním prostředí a vegetaci mezi jednotlivými lokalitami, jako je Kalifornie a Česká republika v mé práci, které mohou významně ovlivnit hodnoty NDVI. Dále je nutné zohlednit, že každý datový zdroj může mít specifické rozmezí hodnot NDVI, což poukazuje na důležitost pečlivého výběru a porovnání dat. Nepřesnosti v datech ESRI Land Cover, v mém případě zejména ve vodních tělesech a urbanizovaných oblastech, vyžadují dodatečnou kontrolu a korekci, aby byly zajištěny co nejpřesnější výsledky. V případě urbanizovaných oblastí je také dobré vzít v potaz městskou zeleň, která může mít vliv na hodnoty NDVI.

Harmonizace dat z dálkového průzkumu představuje klíčový prvek pro přesné monitorování zemědělských oblastí. Srovnání harmonizovaných a neharmonizovaných dat v mé studii a v práci Nguyen a kol. [28] zvyšuje důvěru v robustnost harmonizačních technik a naznačuje cesty pro budoucí metodologická vylepšení. Další výzkum by měl zvážit porovnání s terénními daty, což by rozšířilo možnosti pro přesné a efektivní monitorování vegetace. Závěrem je také dobré říct, že každý satelitní zdroj má své výhody a nevýhody, a proto je také důležité zvážit pro jaké účely data budeme používat.

9. Závěr a přínos práce

Tato práce si kladla za cíl posoudit přesnost produktů Harmonized Landsat Sentinel-2 a PlanetScope Sentinel-2 Harmonized Data pomocí vegetačního indexu NDVI, vypočítaného z multispektrálních satelitních snímků a porovnat je s neharmonizovanými daty. Bakalářská práce splnila všechny v zadání stanovené cíle. Důkladná analýza a srovnání dat poskytly odpovědi na stanovené výzkumné otázky.

Výsledky ukázaly, že hodnoty NDVI vypočítané pro harmonizované a neharmonizované produkty se liší, ale rozdíly nejsou pro většinu aplikací zásadní, což naznačuje, že harmonizovaná data poskytují přesné výsledky blízké původním neharmonizovaným datům. Zvláště zajímavé jsou výsledky pro harmonizovaná data PlanetScope/Sentinel-2, kde hodnota RMSE dosahuje pouze 0,036 pro druhé zájmové území, což je indikátor vysoké přesnosti těchto harmonizovaných dat. Další významný výsledek se týká dat HLS L30/Sentinel-2, pro které koeficient determinace dosahuje hodnoty 0,88 v prvním zájmovém území, což svědčí o výjimečně vysoké korelaci mezi harmonizovanými a původními daty.

Hodnoty NDVI se liší podle typu krajinného pokryvu, což se dalo v důsledku různého odrazu a absorpce světla různými typy vegetace a jiných kategorií krajinného pokryvu očekávat. Analýza ukázala určité rozdíly mezi harmonizovanými a neharmonizovanými údaji ve vybraných oblastech. Tyto rozdíly však nebyly zásadní, což prokázalo schopnost harmonizovaných dat přesně zachytit charakteristiky různých typů krajinného pokryvu. Konzistence, vysoká korelace a relativně nízké hodnoty RMSE mezi harmonizovanými a neharmonizovanými daty umožňují spolehlivé sledování dynamiky krajinného pokryvu a poskytují spolehlivý základ pro dlouhodobé sledování změn ve využívání půdy a stavu vegetace.

Přínosem této práce je důkladné srovnání dvou klíčových datových zdrojů pro monitoring krajinného pokryvu Země, které jsou široce využívány ve vědecké i aplikované sféře. Výsledky mohou poskytnout cenný vstup pro výběr vhodného zdroje dat v závislosti na konkrétních potřebách uživatelů a charakteristikách sledované oblasti.

10. Přehled literatury a použitých zdrojů

- [1] ROGER, Jean-Claude, Eric VERMOTE a Jennifer DUNGAN. *Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS) Product User Guide* [online]. In: . [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: https://lpdaac.usgs.gov/documents/1698/HLS_User_Guide_V2.pdf
- [2] NASA. *OPERATIONAL LAND IMAGER* [online]. [cit. 2024-03-26]. Dostupné z: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/spacecraft-instruments/operational-land-imager/>
- [3] COPERNICUS. *MultiSpectral Instrument (MSI) Overview* [online]. [cit. 2024-03-26]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/msi-instrument>
- [4] USGS, NASA. *HLS Overview* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://lpdaac.usgs.gov/data/get-started-data/collection-overview/missions/harmonized-landsat-sentinel-2-hls-overview/>
- [5] NASA. *TILING SYSTEM* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://hls.gsfc.nasa.gov/products-description/tiling-system/>
- [6] CLAVERIE, Martin, Junchang JU, Jeffrey G. MASEK, Jennifer L. DUNGAN, Eric F. VERMOTE, Jean-Claude ROGER, Sergeii V. SKAKUN a Christopher JUSTICE. The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set. *Remote Sensing of Environment*. 2018, **219**, 145-161. ISSN 0034-4257.
- [7] KINGTON, Joe a Alan COLLISON. *Scene Level Normalization and Harmonization of Planet Dove Imagery* [online]. In: . [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: https://assets.planet.com/docs/scene_level_normalization_of_planet_dove_imagery.pdf
- [8] *PlanetScope Product Specifications* [online]. In: . [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: https://assets.planet.com/docs/Planet_PSScene_Imagery_Product_Spec_letter_screen.pdf
- [9] *Planet Imagery Product Specifications* [online]. In: . [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: https://assets.planet.com/docs/Planet_Combined_Imagery_Product_Specs_letter_screen.pdf

- [10] SPATIALPOST. *What Is NDVI In Remote Sensing? – The Ultimate Guide* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.spatialpost.com/what-is-ndvi-in-remote-sensing/>
- [11] Normalized difference vegetation index. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Normalized_difference_vegetation_index
- [12] CROPIN. *NDVI and its Practical Applications in Agriculture* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.cropin.com/blogs/ndvi-normalized-difference-vegetation-index>
- [13] USGS. *NDVI, the Foundation for Remote Sensing Phenology* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.usgs.gov/special-topics/remote-sensing-phenology/science/ndvi-foundation-remote-sensing-phenology>
- [14] ESRI. *Esri Releases New 2020 Global Land Cover Map* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.esri.com/about/newsroom/announcements/esri-releases-new-2020-global-land-cover-map/>
- [15] ESRI. *Esri Releases Updated Land-Cover Map with New Sets of Global Data* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.esri.com/about/newsroom/announcements/esri-releases-updated-land-cover-map-with-new-sets-of-global-data/>
- [16] ESRI. *AI Enables Rapid Creation of Global Land Cover Map* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.esri.com/about/newsroom/arcuser/ai-enables-rapid-creation-of-global-land-cover-map/>
- [17] Central Valley (California). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Central_Valley_\(California\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Central_Valley_(California))
- [18] Chrudim. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Chrudim>
- [19] Železné hory. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDelezn%C3%A9_hory

- [20] NASA. *EARTHDATA SEARCH* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://search.earthdata.nasa.gov/search>
- [21] PLANET. *Planet Explorer* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.planet.com/explorer/>
- [22] USGS. *EarthExplorer* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- [23] COPERNICUS. *Copernicus browser* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>
- [24] ESRI. *Land Cover Explorer* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer/>
- [25] Root-mean-square deviation. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Root-mean-square_deviation
- [26] Augmenting Landsat time series with Harmonized Landsat Sentinel-2 data products: Assessment of spectral correspondence. *Science of Remote Sensing*. 2021, **4**. ISSN 2666-0172.
- [27] TOMÍČEK, Jiří, Jan MIŠUREC, Petr LUKEŠ a Markéta POTŮČKOVÁ. Retrieval of Harmonized LAI Product of Agricultural Crops from Landsat OLI and Sentinel-2 MSI Time Series. *Agriculture*. 2022, **12**(12):2080.
- [28] Nguyen MD, Baez-Villanueva OM, Bui DD, Nguyen PT, Ribbe L. Harmonization of Landsat and Sentinel 2 for Crop Monitoring in Drought Prone Areas: Case Studies of Ninh Thuan (Vietnam) and Bekaa (Lebanon). *Remote Sensing*. 2020; 12(2):281.

11. Přílohy

Zdroj	Minimum	První kvartil	Medián	Třetí kvartil	Maximum	IQR
PlanetScope Harmonized	-1	-0,2118	0,020856	0,6195	1	0,83068
Sentinel-2	-0,10075	0,21125	0,42514	0,55249	0,70664	0,34124
HLS L30	-0,00777	0,36098	0,60646	0,93156	0,93156	0,61422
Landsat 8	-0,0563	0,19979	0,31726	0,40367	0,54432	0,20557
HLS S30	-0,1629	0,352	0,63284	0,7885	0,9439	0,4365

Tabulka 1: V tabulce jsou zaznamenány hodnoty NDVI z prvního zájmového území (Central Valley), které se nachází v box-plotu.

Zdroj	Minimum	První kvartil	Medián	Třetí kvartil	Maximum	IQR
PlanetScope Harmonized	-0,06785	0,44278	0,60144	0,80509	0,92385	0,36231
Sentinel-2	-0,15099	0,24148	0,37226	0,51056	0,67338	0,26909
HLS L30	-0,44702	0,42607	0,58879	0,77957	0,93554	0,3535
Landsat 8	-0,07085	0,17613	0,24849	0,34986	0,52691	0,17373
HLS S30	-0,22872	0,39393	0,57839	0,77439	0,91304	0,38046

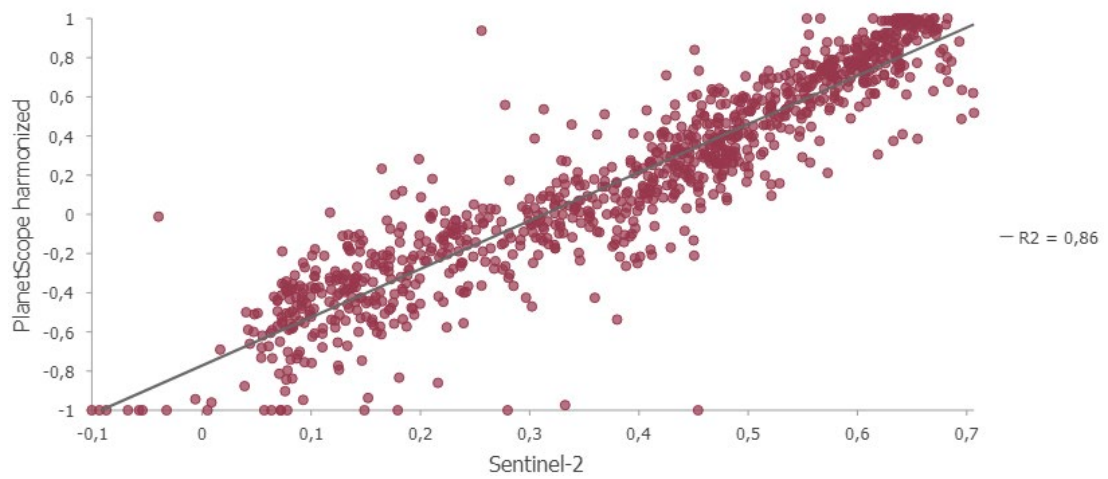
Tabulka 2: V tabulce jsou zaznamenány hodnoty NDVI z druhého zájmového území (Chrudimská oblast), které se nachází v box-plotu.

Typ pokryvu	PlanetScope harmonized	Sentinel-2	HLS L30	Landsat 8	HLS L30
Crops (Plodiny)	0,135375	0,380101	0,291318	0,293458	0,564309
Trees (Stromy/Lesy)	0,620093	0,553561	0,621288	0,407284	0,799868
Built Area (Urbanizovaná oblast)	-0,424481	0,12962	-0,119892	0,124529	0,223148
Rangeland (Pastviny)	-0,141882	0,291147	0,13006	0,231298	0,451125
Water (Vodní plochy)	-0,991919	-0,067403	-0,709755	-0,015004	-0,006918

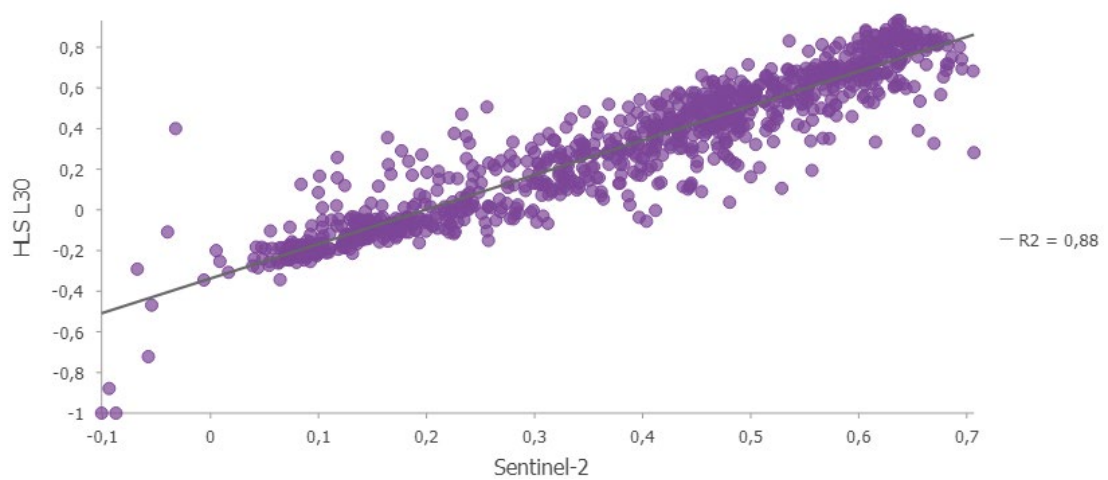
Tabulka 3: Průměrné hodnoty NDVI pro různé typy krajinného pokryvu v prvním zájmovém území (Central Valley).

Typ pokryvu	PlanetScope harmonized	Sentinel-2	HLS L30	Landsat 8	HLS L30
Crops (Plodiny)	0,696583	0,442785	0,670703	0,326937	0,649821
Trees (Stromy/Lesy)	0,812989	0,546053	0,811209	0,381516	0,801433
Built Area (Urbanizovaná oblast)	0,299555	0,135942	0,287299	0,120623	0,27913
Rangeland (Pastviny)	0,698693	0,440024	0,665753	0,318546	0,647232
Water (Vodní plochy)	0,232896	-0,044069	-0,144909	-0,018789	0,105563

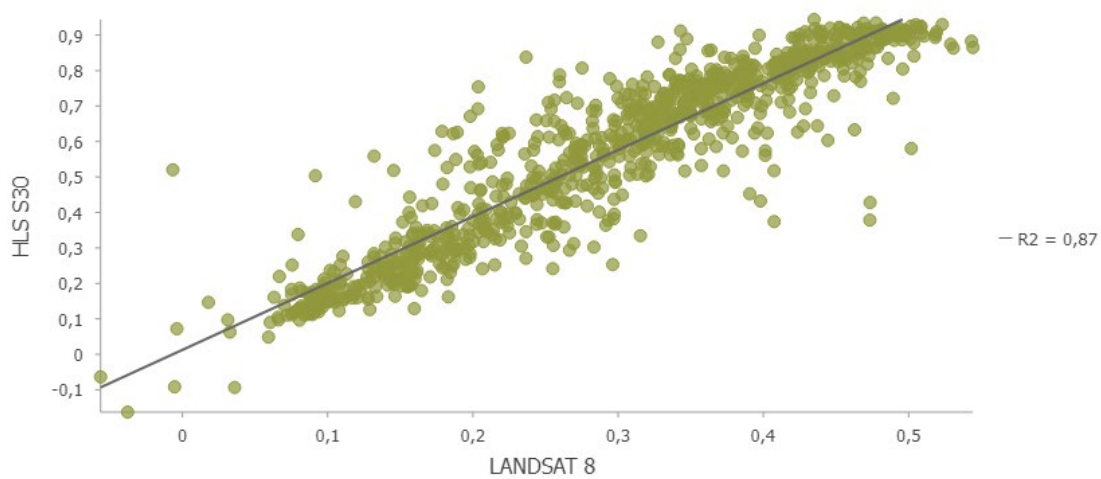
Tabulka 4: Průměrné hodnoty NDVI pro různé typy krajinného pokryvu v druhém zájmovém území (Chrudimská oblast).



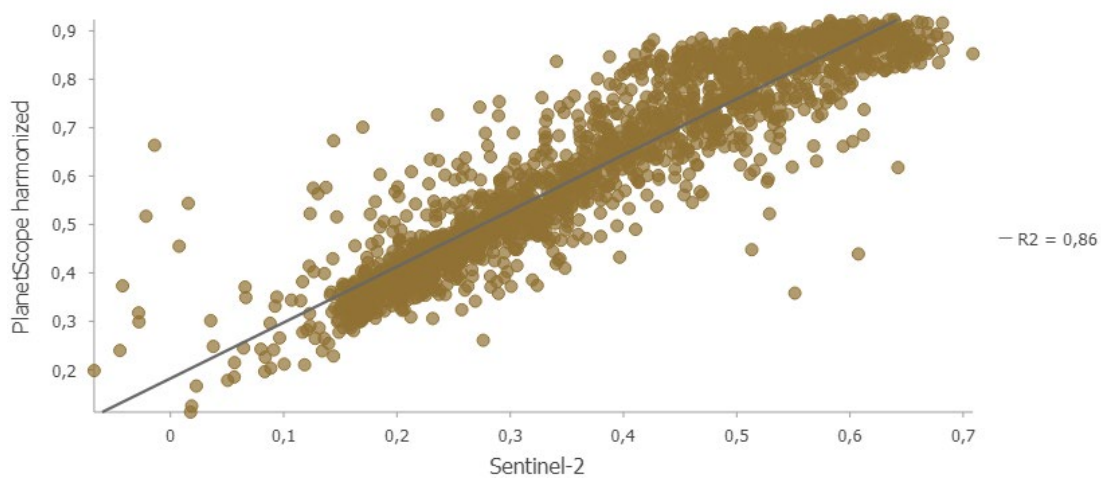
Obrázek 1: Graf znázorňující lineární regresi hodnot NDVI mezi PlanetScope harmonized a Sentinel-2. (Central Valley)



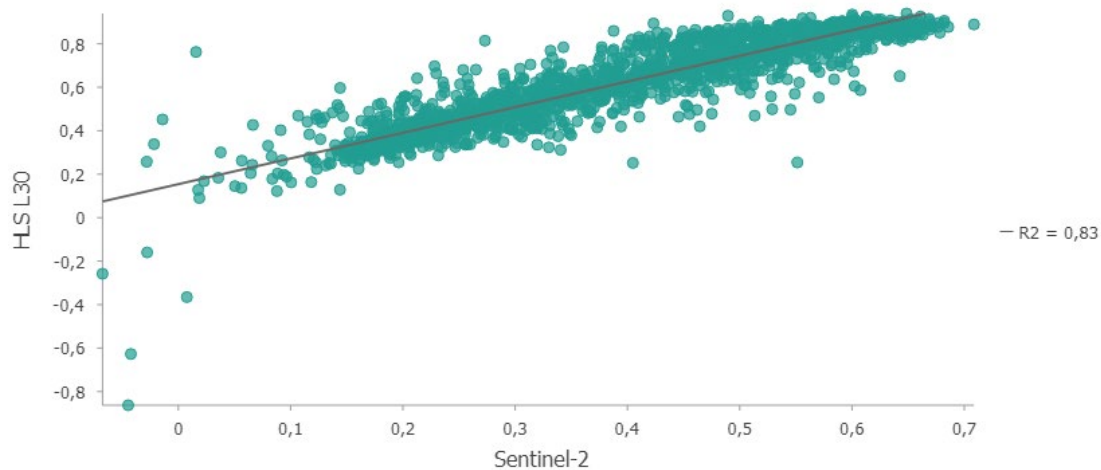
Obrázek 2: Graf znázorňující lineární regresi hodnot NDVI mezi HLS L30 a Sentinel-2. (Central Valley)



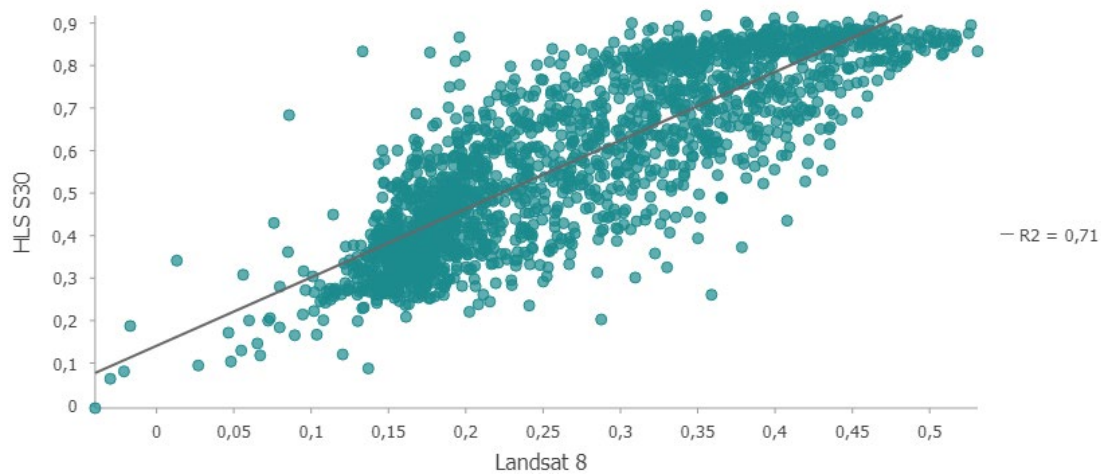
Obrázek 3: Graf znázorňující lineární regresi hodnot NDVI mezi HLS S30 a Landsat 8. (Central Valley)



Obrázek 4: Graf znázorňující lineární regresi hodnot NDVI mezi PlanetScope harmonized a Sentinel-2. (Chrudimská oblast)



Obrázek 5: Graf znázorňující lineární regresi hodnot NDVI mezi HLS L30 a Sentinel-2. (Chrudimská oblast)



Obrázek 6: Graf znázorňující lineární regresi hodnot NDVI mezi HLS S30 a Landsat 8. (Chrudimská oblast)