

Metodika zpracování hemisférických fotografií

Konečný uživatel výsledků: **Správa Národního parku Šumava**
1. máje 260
385 01 Vimperk

Název projektu: Inovativní měření mikroklimatu jako podklad pro management lesů v NP Šumava

Číslo projektu: TJ02000281

Řešitel projektu: Botanický ústav AV ČR, v. v. i., Zámek 1, Průhonice, 25243, Česká republika

Doba řešení: 06/2019 – 05/2021

Důvěrnost a dostupnost: S – Úplné a pravdivé údaje o projektu nepodléhající ochraně podle zvláštních právních předpisů.

Informace o autorském týmu:

RNDr. Josef Brůna, Ph.D., Řešitel
doc. Ing. Jan Wild, Ph.D., Mentor
Ing. Lucia Hederová, Ph.D., Člen řešitelského týmu
Mgr. Tereza Klinerová, Člen řešitelského týmu
Mgr. Martin Macek, Člen řešitelského týmu

**Další informace o projektu:**

Hlavním cílem je tvorba souboru mikroklimatických map lesních porostů NP Šumava zohledňujících vliv současného stavu lesa na mikroklima. Tento cíl realizujeme vytvořením reprezentativní sítě mikroklimatických stanic a kontinuálním měřením teplotních a vlhkostních charakteristik po dobu minimálně jednoho roku. Tohoto cíle bude dosaženo v závěru projektu po pečlivé syntéze všech získaných dat.

Dalšími cíli je pak tvorba dvou metodik (Metodika zpracování hemisférických fotografií; Metodika měření mikroklimatu pomocí mikroklimatických stanic TMS), které vycházejí z postupů vyvinutých uchazečem projektu a které si vyžádal aplikační garant. Obě metodiky ale mají širší možnosti uplatnění a budou pravděpodobně využívány i jinými subjekty jako jsou ostatní správy NP.

Obsah

Úvod.....	4
Metodika	5
1. Pořízení HF.....	5
1.1 Vybavení	5
1.2 Postup	6
1.3 Faktory ovlivňující kvalitu HF.....	7
2. Analýza HF.....	9
2.1 Přejmenování HF.....	9
2.3 Obrazová analýza	9
Převod na stupně šedé.....	10
Korekce obrazových vad.....	10
Registrace hemisféry.....	11
Klasifikace (prahování) obrazu	11
Vizuální kontrola a výběr expozičně vhodné HF	11
Analýza strukturních atributů porostu	12
Literatura.....	13
Příloha 1	15
Zkrácený terénní manuál pro stanovení zápoje hemisférickou fotografií.....	15
Příloha 2	16
Popis skriptu „HemisphereR“ pro automatizované zpracování hemisférických fotografií v programovém prostředí R.....	16
Příklad volání funkce:	19

Úvod

Analýza hemisférické fotografie je zavedená metoda pro stanovení světelných podmínek a některých strukturních charakteristik v lesním porostu (aplikace viz např. Jelaska et al., 2006, Thimonier et al., 2010, Chianucci et al., 2016). Metoda umožňuje na základě obrazové analýzy hemisférické fotografie (tj. fotografie pořízené objektivem typu rybí oko s úhlem záběru 180°) učinit odhad množství procházejícího přímého, difuzního i celkového množství fotosynteticky aktivního záření (Frazer et al., 1999). Ze strukturních charakteristik potom metoda umožňuje získat odhad indexu listové plochy a při známé výšce porostu pak i plochu porostní mezery (Jonckheere, 2004).

Metoda analýzy hemisférické fotografie byla používána již před nástupem digitální fotografie, rozvoj této metody však umožnil až její nástup. V současné době existuje řada programů pro obrazovou analýzu hemisférické fotografie, z nichž některé jsou již technicky zastaralé. Celý proces v důsledku technologického pokroku doznal proto určitých změn oproti dříve zavedeným postupům. Ve světě však neexistuje jednotná metodika pro pořízení a zpracování fotografií, která by zajistila přenositelnost výsledků. Výsledky tak mohou být citlivé na kvalitu vstupní fotografie i její následné zpracování (Inoue et al., 2004; Jarčuška et al., 2010; Pueschel et al., 2012; Robison and McCarthy, 1999). Z tohoto důvodu předkládáme jednotnou metodiku pro pořízení a následné zpracování hemisférických fotografií s ohledem na současné vybavení a efektivitu zpracování a s upravenými vstupními parametry modelů s ohledem na potřeby zadavatele. Kritickými místy v procesu jsou zejména nastavení expozice fotografie, prahování fotografie a korektní nastavení parametrů modelu pro převod obrazové informace na množství procházejícího záření. Z hlediska efektivity je důležité na základě očekávaného množství zpracovaných fotografií nastavit možnosti dávkového zpracování, které umožňují jen některé (zpravidla placené) programy. Z hlediska kvality je potom nutné nastavit způsob kontroly kvality celého procesu.

Metodika

Metodika hemisférické fotografie (HF) se skládá ze dvou základních kroků, a to z pořízení HF a z její analýzy. Vytvoření HF zahrnuje fotografování pomocí digitálního zrcadlového fotoaparátu (zrcadlovky) a objektivu typu „rybí oko“ s úhlem záběru 180°, který, pokud je orientován směrem nahoru do korun porostu, zachytává celou hemisféru viditelné oblohy na jedné fotografii (Hall et al., 2017). Analýzou HF se rozumí softwarové zpracování fotografií a spočívá především v prahování HF (převod informací z barevných kanálů na černé/bílé pixely volné oblohy a zástinu porostu) a korektním nastavení parametrů modelu pro převod obrazové informace na množství procházejícího záření.

1. Pořízení HF

1.1 Vybavení

Pro pořízení kvalitní HF je potřeba následujícího materiálního vybavení:

- objektiv typu kruhové rybí oko (Circular Fisheye) s vertikálním, horizontálním i diagonálním úhlem záběru 180°. V současné době jsou na trhu takovéto typy objektivů především pro zrcadlovky typu full-frame (požadovaná ohnisková vzdálenost 8 mm), např.:
 - o Sigma 8mm f/3,5 EX DG Fisheye circular
 - o Rokinon 8mm f/3,5mm Fisheye
 - o Meike 8mm f/3,5mm Fish-eye CS
 - o Peleng 8mm 3,5/8A

Pro zrcadlovky typu APS-C je potřebná ohnisková vzdálenost 4,5 mm. Jediným vhodným modelem je Sigma 4,5mm f/2.8 (již se nevyrábí, je dostupný v bazarech).

- digitální zrcadlovka (kompatibilní s bajonetem daného objektivu dle výrobce). Ideálně s funkcí expozičního bracketingu (automatické pořízení série snímků s odlišnou expozicí). Výhodou je i možnost uložení uživatelského programu (C1... pro Canon, U1... pro Nikon).
- stativ/monopod s hlavou umožňující otočení fotoaparátu kolmo vzhůru (pro monopody existují lehké vyklápěcí hlavy). Na sestaveném monopodu s fotoaparátem doporučujeme vyznačit požadované vysunutí segmentů stativu odpovídající zvolené výšce focení.
- magnetický kompas
- vodováha do sáněk blesku se dvěma libelami (doporučujeme jednu záložní)

1.2 Postup

Umístění fotoaparátu

Ideální je vyfotit nejprve název plochy/pozice, na které chceme pořídit HF (program A nebo P), pak celkový záběr na samotnou plochu (pro účely dokumentace) a následně vyfotit HF ve třech různých expozicích. Jednotnost jakéhokoli postupu ulehčí práci v příštích krocích.

Místo focení by mělo být ve středu výzkumné plochy. Pokud se však v jeho bezprostřední blízkosti (cca 1 metr) nachází strom s tloušťkou kmene nad 20 cm, doporučuje se fotoaparát se stativem posunout dále od stromu tak, aby zachycený obraz byl reprezentativní pro celou výzkumnou plochu a nedošlo k nadhodnocení korunového zápoje v kalkulaci (Liu and Pattey, 2010). Pro výzkumné plochy větší než 100 m² je vhodné pořídit více hemisférických fotografií pravidelně rozmístěných tak, aby zachytily variabilitu korunového zápoje v ploše.



Obr. 1 Fotografování HF v interiéru lesního porostu.

Fotoaparát s objektivem a vodováhou v sáňkách blesku umístíme na stativ. Stativ (postačí monopod) nastavíme tak, aby se přední čočka objektivu nacházela ve výšce 1,3 m nad zemí. Obraz korunového zápoje tak nebude překryt vegetací bylinného patra. Výška stativu může být v případě potřeby stanovena odlišně, obecně ale platí, že vzdálenost mezi objektivem a nejbližším listem by měla být nejméně čtyřnásobkem šířky listu (Chianucci and Cutini, 2012). Fotoaparát nastavíme s pomocí

vodováhy tak, aby osa objektivu směřovala svisle, a zároveň fotoaparát orientujeme tak, aby horní strana (sáňky blesku) směřovala k severu. Magnetický kompas může být ovlivněn magnetickým polem fotoaparátu, je proto potřeba jej používat s dostatečným odstupem od fotoaparátu či jiných rušivých zdrojů (Obr. 1). V terénu může pomoci i známá orientace výzkumné plochy. Výsledná HF tak bude mít sever nahoře a východ nalevo. Kmeny svisle rostlých stromů by měly směřovat do středu obrazu. Správná orientace HF ke světovým stranám hraje klíčovou roli pro analýzu přímého a celkového fotosynteticky aktivního záření.

Následně exponujeme 3 expozičně odlišné HF s využitím expozičního bracketingu (-3 EV, -2 EV, -1 EV; Obr. 3), podrobná metodika pro nastavení expozičního programu viz níže. Aby nedošlo k rozmazání obrazu při delších expozičních časech, je vhodné používat samospoušť nebo dálkovou spoušť. Kvalitu HF zkontrolujeme na displeji fotoaparátu ještě na místě. Důležité je, aby měly dostatečnou hloubku ostrosti a aby byla HF vyhotovena ve všech expozicích.

1.3 Faktory ovlivňující kvalitu HF

Zaostření obrazu

Fotoaparát spolu s objektivem používáme v manuálním ostřicím režimu se zaostřovacím bodem na nekonečno, aby nedošlo k nechtěnému zaostření na popředí. Před focením vždy zkontrolujeme nastavení ostření a ujistíme se, že čočka objektivu není znečištěna. Zaostřovací značky na objektivu jsou pouze orientační, kvalitu zaostření je třeba kontrolovat v průhledovém hledáčku. Na hloubku ostrosti a kvalitu kresby objektivu má vliv použitá clona. Obecně platí, že hloubka ostrosti roste s clonovým číslem, ale nejkvalitnější obraz (z hlediska dalších vad obrazu – vinětace, chromatická aberace, kontrast, vnitřní odlesky, ostrost v okrajích obrazového pole) mají objektivy při prostředních hodnotách clony. Pokud to světelné podmínky umožňují, volíme clonové číslo o tři stupně vyšší, než je jeho maximální světelnost. Tj. pro objektiv Sigma 4,5mm f/2.8 je požadované clonové číslo $f=8$.

Světelné podmínky

Světelné podmínky panující v době focení jsou zcela zásadní pro reprodukovatelnost výsledků HF. Nejvhodnější je fotit bez přímého slunečního záření, tedy při západu slunce, za soumraku nebo pod rovnoměrně zataženou oblohou (Obr. 2). V těchto podmínkách světlu dominuje modrá část viditelného spektra, ve které mají listy nižší odrazivost a propustnost, což způsobí, že listy jsou na fotce tmavší (Chianucci, 2020). Pokud nelze zajistit ideální podmínky, je přesto možné v některých případech pořídit použitelnou HF při přizpůsobení expozice aktuálním podmínkám. V případě zcela jasné oblohy je možné dosáhnout dobrých výsledků, pokud je sluneční disk v zákrytu kmene stromu. K potlačení vnitřních odlesků v případě přímého slunečního svitu je vhodné nastavit vyšší clonové číslo ($f/11$ až $f/22$). Listy

a kmeny stromů ozářené přímým slunečním zářením však mohou mít vyšší světlost než samotná obloha, může být tedy nutné upravit expozici i o více než -3 EV, aby nedocházelo k přepalům v bílé. Výsledná fotografie potom může vyžadovat manuální retuš odlesků na kmenech a přepalů v blízkosti slunečního disku v grafickém editoru.

Z hlediska expozice je nejproblematictější obloha s kupovitou oblačností a přímým slunečním svitem, kdy rozdíly ve světlosti mraků a oblohy mohou zcela znemožnit následné zpracování fotografie.



Obr. 2 HF pořízené za vhodných světelných podmínek, tedy pod rovnoměrně zataženou oblohou. Listy se na fotce jeví tmavší, což vytváří žádoucí kontrast s oblohou.

Expozice

Nastavením plně automatické expozice nejsme schopni vytvořit fotografii se spolehlivým odhadem otevřenosti zápoje (Chen et al., 1991; Zhang et al., 2005), což může způsobit její podhodnocení v rozvolněných porostech, a naopak nadhodnocení v hustých porostech (Zhang et al., 2005). Ideální expozice je taková, která vytváří největší kontrast mezi pixely s listím a pixely s oblohou a s minimální saturací na obou koncích histogramu jasu – tj. pokud možno bez přepalů (Leblanc et al., 2005). Proto doporučujeme pořídit alespoň 3 HF z jedné plochy/pozice s různou expozicí a z nich vybrat nejlepší expozici během post-processingu.

Aby se zaručila stálá kvalita ostrosti obrazu, je vhodné nastavit fotoaparát do režimu A (aperture priority – priorita clony) s clonou fixně na f/8 a expozičním bracketingem korigovat čas tak, aby výsledné záběry byly expozičně korigovány o -3 EV, -2 EV a -1 EV. Protože se obraz hemisférického objektivu promítá pouze na kruh ve středové části snímku, je nutné nastavit expoziční režim se zdůrazněným středem (center-weighted metering mode).

Symbol pro měření se zdůrazněným středem:



UPOZORNĚNÍ: Nepoužívat bodové měření. To by zohledňovalo pouze středový bod, což by vedlo k velkému rozptylu expozice v závislosti na tom, zda je střed zakryt vegetací, či nikoliv.

Rozlišení fotografie

Současné digitální zrcadlovky poskytují dostatečné rozlišení pro účely HF. S ohledem na možnosti pracoviště (velikost datového úložiště a výpočetní kapacity) pro zpracování HF je možné používat i snížené rozlišení fotografie, minimálně však 6MPx (2000*3000px).

2. Analýza HF

2.1 Přejmenování HF

Prvním krokem analýzy HF je jejich přejmenování. Jde o poměrně zdoluhavou, nicméně důležitou část, ve které jakákoli chyba může způsobit špatnou interpretaci výsledků. Předtím než začneme HF přejmenovávat, zálohujeme originály na externí úložiště.

Vzhledem k počtu pořízených fotografií existuje několik možností, jak efektivně fotky přejmenovat. Pokud jde o jednotky fotek, je možné učinit tak jednoduchým přepsáním názvu HF. V případě, že jde o větší počet fotek, nabízí se využití některých z následujících softwarů:

- Total Commander (<https://www.ghisler.com/download.htm>), funkce „hromadné přejmenování“
- Altap Salamander (<https://www.altap.cz/cz/>) – zdarma i pro komerční použití
- ReNamer (<https://www.den4b.com/products/renamer>)
- R (<https://cran.r-project.org/bin/windows/base/>)

Fotky kódujeme podle názvu plochy s přiřazením druhu expozice podle následujícího vzoru:

IDplocha1_a.jpg	(-2 EV)
IDplocha1_b.jpg	(-3 EV)
IDplocha1_c.jpg	(-1 EV)
IDplocha2_a.jpg	(-2 EV) ...

V případě, že je na jedné ploše foceno více HF v různých pozicích, kód upravíme, např.:

IDplocha1_1_a.jpg	(-2 EV)
IDplocha1_1_b.jpg	(-3 EV)
IDplocha1_1_c.jpg	(-1 EV)
IDplocha1_2_a.jpg	(-2 EV) ...

2.3 Obrazová analýza

Pro výpočet strukturních charakteristik je třeba klasifikovat obrazové pixely zakryté vegetací/terénem a pixely oblohy. Zpracování obrazu se děje v následujících krocích: 1) převod barevného obrazu na

stupně šedé s potlačením optických vad obrazu; 2) registrace kruhu hemisféry; 3) klasifikace (prahování) obrazu na bitovou mapu; 4) vizuální kontrola výsledného obrazu a případné manuální úpravy s opakováním kroků 2 až 4; 5) výpočet strukturních parametrů porostu.

K obrazové analýze lze použít specializovaný software. Dostupný software se liší mírou automatizace jednotlivých procesů a licencí pro použití.

WinScanopy (Regent Instruments Inc., placená licence – orientační cena 60 000 Kč za licenci)

program nabízí pokročilé funkce zpracování obrazu včetně nástrojů pro prahování fotografie, dávkového zpracování a odvození množství strukturních parametrů (zápoj, přímé, difúzní, celkové záření, LAI a další).

Gap Light Analyzer (Cary Institute of Ecosystem Studies, freeware)

program poskytuje základní nástroje pro zpracování hemisférických fotografií, pouze manuální prahování, bez dávkového zpracování. Množství odvozených strukturních parametrů (zápoj, přímé, difúzní, celkové záření, LAI a další).

R Skript (příloha této metodiky, vytvořený pro účely projektu TAČR, open source)

skript v programu R provádí automatickou klasifikaci obrazu, korekci zkreslení objektivu a vinětace a výpočet zápoje. Detailní popis algoritmů použitých ve skriptu viz příloha 2.

Převod na stupně šedé

Převod barevné informace na stupně šedé by měl vést k maximalizaci kontrastu mezi oblohou a vegetací. Nepoužije se proto průměr hodnot jednotlivých barevných kanálů, ale místo toho se použije normalizovaný rozdíl mezi dvojnásobkem hodnoty modrého kanálu a zeleným kanálem. Tím se dosáhne zesvětlení pixelů oblohy s převahou modré složky a naopak ztmavení pixelů zakrytých listovou plochou vegetace s převahou zeleného kanálu. Barevně neutrální části obrazu (šedé mraky) si zachovají světllost.

Korekce obrazových vad

Lepší kvality obrazu pro následnou analýzu lze dosáhnout korekcí obrazových vad. Vinětace (pokles světelnosti směrem k okrajům obrazového pole) se u objektivů projevuje v závislosti na použité cloně, výraznější bývá zpravidla při plně otevřené cloně. Ostrost obrazu lze upravit softwarovým doostřením, jeho míru je třeba regulovat, aby nedošlo k nežádoucímu zvýraznění šumu.

Korekční faktory pro objektiv Sigma 4,5mm byly převzaty z Cauwerts et al., (2012).

Registrace hemisféry

Oblast fotografie, na kterou je promítnut hemisférický obraz, se může lišit v závislosti na velikosti senzoru a konkrétní kombinaci těla fotoaparátu a použitého objektivu. Pozice kruhu je definována relativním posunem vůči středu snímku a relativním průměrem kruhu vůči délce strany obrazu. Absolutní velikost v obrazových pixelech je třeba určit s ohledem na zvolené rozlišení fotografie.

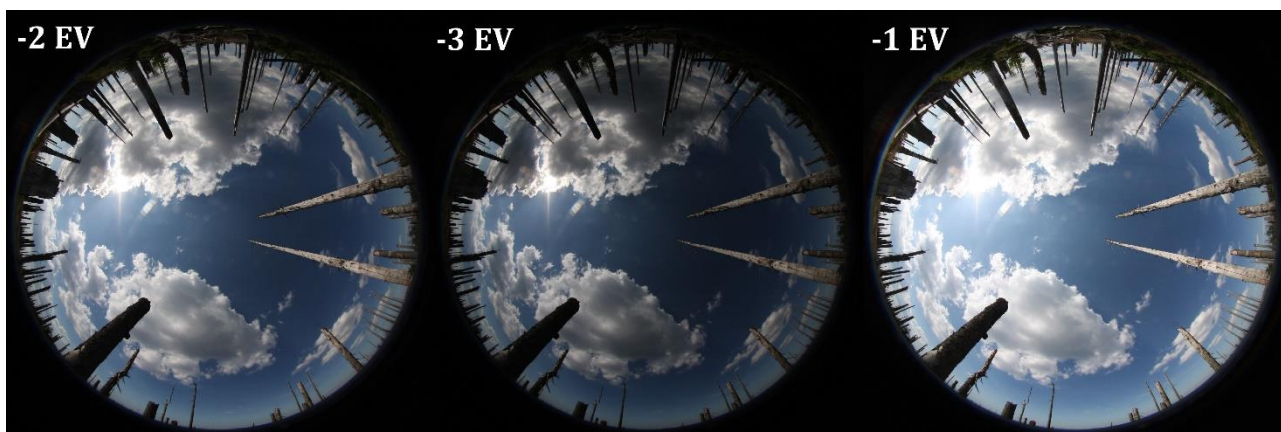
Klasifikace (prahování) obrazu

Pro automatickou detekci prahové hodnoty pro klasifikaci obrazu je k dispozici více algoritmů. Pro účely hemisférické fotografie se doporučují tři: „Edge detection“, „Minimum histogram“ a „Intermodes“ (Glatthorn and Beckschäfer, 2014). R skript používá jako výchozí metodu „Intermodes“ z knihovny *autothresholdr* (Landini et al., 2017), lze ale zvolit i další metody včetně „Minimum histogram“. Metoda „edge detection“ je implementovaná v software SideLook (<http://www.appleco.ch/>), který je však již zastaralý a nemusí fungovat správně v současných operačních systémech.

Vizuální kontrola a výběr expozičně vhodné HF

Z automaticky prahované fotografie je potřeba vybrat vyhovující snímek z trojice expozičních variant. Vizuálním porovnáním prahované HF s originálem se identifikuje fotografie, která nevykazuje větší množství chybně klasifikovaných pixelů (tj. přítomnost černých pixelů v oblasti oblohy nebo přítomnost bílých pixelů, problematické bývají zejména odlesky na kmenech stromů, osvětlené koruny listnatých stromů a jemné struktury v protisvětle, viz Obr. 3). Pokud ani jedna z trojice neposkytuje uspokojivé výsledky, je nutné stanovit práh manuálně nebo v grafickém editoru (Adobe Photoshop, Gimp aj.) upravit kontrast či světlost problematických oblastí (Obr. 4).

V případě, že je soubor fotografií focen v obdobném typu lesa za srovnatelných světelných podmínek, bývá nejvhodnější stejná expoziční varianta pro všechny. Všeobecně platí, že čím je větší stromový zápoj, tím více je potřeba podexponovat expozici oproti hodnotě vypočtené expoziční automatikou. Vybrané fotografie s korektně klasifikovanými pixely oblohy a vegetace zkopírujeme do samostatné složky určené pro finální analýzu strukturních parametrů. Pokud je analýza provedena s použitím R skriptu „HemisphereR“, je hodnota stromového zápoje vypočtena a uložena do tabulky pro všechny fotografie, a stačí tak vybrat pouze vypočtené hodnoty pro korektně klasifikovaný záběr z trojice expozičních variant filtrováním v tabulce.



Obr. 3 HF vyhotoveny ve třech různých expozičních časech při nevyhovujících světelných podmínkách. Osvětlené kmeny souší jsou světlejší než tmavé části mraků. Manuální úprava takových záběrů je nutná.



Obr. 4 Originál HF (vlevo) vyfocen za slunného dne byl manuálně graficky upraven, aby nedošlo k chybné klasifikaci pixelů překreslením osvětlených souší černou (vpravo). Tato místa by mohla být v následujícím kroku analýzy HF chybně naprahovaná jako bílé pixely, což by vedlo k neadekvátním výsledkům analýzy.

Analýza strukturních atributů porostu

Z korektně klasifikovaného obrazu lze spočítat strukturní atributy porostu (otevřenost zápoje, index listové plochy), respektive atributy charakterizující světelné podmínky v bodě měření (index přímého, difúzního a celkového záření). Skript „HemisphereR“ poskytuje pouze otevřenost zápoje pro variabilní zenitové úhly. Software Gap Light Analyzer a WinScanopy implementují všechny výše zmíněné indexy, způsob jejich výpočtu a interpretace je uveden v příslušných manuálech.

Aby byly strukturní parametry spočítány správně, je třeba dodržet následující zásady:

- pozice kruhu hemisféry (registrace hemisféry) musí být přesně zadána. Střed kruhu nemusí být vždy přesně ve středu obrazové plochy, poloměr hemisféry se může mírně lišit v závislosti na

konkrétním fotoaparátu. Pro každou kombinaci těla fotoaparátu a objektivu je proto vhodné pořídit fotografii např. v místnosti, kde budou jasně zřetelné okraje hemisférické plochy. Pro výpočet přímého záření je nutné nastavit orientaci fotografie k světovým stranám.

- V nastavení programu musí být zadány parametry zkreslení objektivu (projekční funkce, převádějící relativní vzdálenost od obrazového středu na zenitový úhel), pro objektiv Sigma 4,5mm f/2.8 lze vypočítat dle rovnice $r = \sin(\theta / 1.997) / 0.70794$, kde r je relativní vzdálenost obrazového bodu od středu hemisféry vůči poloměru celé hemisféry a θ je zenitový úhel (úhel od středu optické osy objektivu).

Literatura

- Cauwerts, C., Bodart, M., Deneyer, A., 2012. Comparison of the vignetting effects of two identical fisheye lenses. LEUKOS - J. Illum. Eng. Soc. North Am. 8, 181–203. <https://doi.org/10.1582/LEUKOS.2012.08.03.002>
- Chen, J.M., Black, T.A., Adams, R.S., 1991. Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of a forest stand. Agric. For. Meteorol. 56, 129–143. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(91\)90108-3](https://doi.org/10.1016/0168-1923(91)90108-3)
- Chianucci, F., 2020. An overview of in situ digital canopy photography in forestry 242, 227–242.
- Chianucci, F., Cutini, A., 2012. Digital hemispherical photography for estimating forest canopy properties: Current controversies and opportunities. IForest 5, 290–295. <https://doi.org/10.3832/ifor0775-005>
- Chianucci, F., Disperati, L., Guzzi, D., Bianchini, D., Nardino, V., Lastri, C., Rindinella, A., Corona, P., 2016. Estimation of canopy attributes in beech forests using true colour digital images from a small fixed-wing UAV. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.12.005>
- Frazer, G.W., Canham, C.D., Lertzman, K.P., 1999. Gap Light Analyzer (GLA): Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual and program documentation. Program.
- Glatthorn, J., Beckschäfer, P., 2014. Standardizing the protocol for hemispherical photographs: Accuracy assessment of binarization algorithms. PLoS One 9, e111924. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111924>
- Hall, R.J., Fournier, R.A., Rich, P., 2017. Introduction, in: Hemispherical Photography in Forest Science: Theory, Methods, Applications. pp. 1–13. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1098-3_1
- Inoue, A., Yamamoto, K., Mizoue, N., 2004. Effects of image quality, size and camera type on forest light environment estimates using digital hemispherical photography. Agric. For. Meteorol. 126, 89–97.

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.06.002>

- Jarčuška, B., Kucbel, S., Jaloviar, P., 2010. Comparison of output results from two programmes for hemispherical image analysis : Gap Light Analyser and WinScanopy. Development 2010, 147–153.
- Jelaska, S., AntoniĆ, O., Bozić, M., Križan, J., Kušan, V., 2006. Responses of forest herbs to available understory light measured with hemispherical photographs in silver fir–beech forest in Croatia. Ecol. Modell. 194, 209–218. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.10.013>
- Jonckheere, I., 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. Agric. For. Meteorol. 121, 19–35. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.027>
- Landini, G., Randell, D.A., Fouad, S., Galton, A., 2017. Automatic thresholding from the gradients of region boundaries. J. Microsc. 265, 185–195. <https://doi.org/10.1111/jmi.12474>
- Leblanc, S.G., Chen, J.M., Fernandes, R., Deering, D.W., Conley, A., 2005. Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forests. Agric. For. Meteorol. 129, 187–207. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.09.006>
- Liu, J., Pattey, E., 2010. Retrieval of leaf area index from top-of-canopy digital photography over agricultural crops. Agric. For. Meteorol. 150, 1485–1490. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.08.002>
- Pueschel, P., Buddenbaum, H., Hill, J., 2012. An efficient approach to standardizing the processing of hemispherical images for the estimation of forest structural attributes. Agric. For. Meteorol. 160, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.02.007>
- Robison, S.A., McCarthy, B.C., 1999. Potential factors affecting the estimation of light availability using hemispherical photography in oak forest understories. J. Torrey Bot. Soc. 126, 344–349.
- Thimonier, A., Sedivy, I., Schleppi, P., 2010. Estimating leaf area index in different types of mature forest stands in Switzerland: a comparison of methods. Eur. J. For. Res. 129, 543–562. <https://doi.org/10.1007/s10342-009-0353-8>
- Zhang, Y., Chen, J.M., Miller, J.R., 2005. Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation, Agricultural and Forest Meteorology. Elsevier.

Příloha 1

Zkrácený terénní manuál pro stanovení zápoje hemisférickou fotografií

- 1) Před výjezdem zkontrolovat stav techniky – volné místo na paměťové kartě, vyčistit optiku, dobít baterie, libelka, kompas, stativ s destičkou
- 2) Vyfotit tabulku s číslem výzkumné plochy a přehledovou fotografii (boční pohled) porostu
- 3) Lokalizace fotoaparátu s rybím okem (na stativu) – odejmout sluneční clonu a krytku, čočka objektivu ve výšce 1,3 m nad zemí, minimálně 1 m od kmene tloušťky > 20 cm. Vodováha v sáňkách blesku směřuje k severu, osa objektivu je svisle.
- 4) Nastavení expozice – expoziční režim A (priorita clony), clona F=8, center-weighted  korekce expozice (bracketing) -3 EV, -2 EV, -1 EV, manuální ostření na nekonečno. Použít samospoušť nebo dálkovou spoušť.
- 5) Vizuální kontrola expozice pořízených fotografií – zaostření, přepaly (pokud jsou přepaly v bílé i u fotografie s expozicí -3 EV je třeba korigovat expozici ještě více, až do -5 EV v případě zcela zapojených porostů).

Příloha 2

Popis skriptu „HemisphereR“ pro automatizované zpracování hemisférických fotografií v programovém prostředí R

Skript byl napsán pro programové prostředí R ver. 3.6.2 (R Core Team, 2020, <https://www.r-project.org>). Využívá knihovny *imager*, *jpeg*, *autothresolder* a *exifr*. Program i použité knihovny jsou distribuovány pod GNU licenci (volně šiřitelný program). Pro spuštění a editaci skriptu doporučujeme program RStudio (RStudio, Inc, <https://rstudio.com>). Knihovna *exifr* načítá data o expozici z EXIF. Vyžaduje instalaci externího freeware programu Perl (<http://strawberryperl.com/>) a ExifTools (<https://exiftool.org/>). Knihovny pro načítání informace z EXIF nejsou nutné pro fungování programu, údaje lze zadat i ručně. Výchozí nastavení je optimalizováno pro fotoaparát Canon (s čipem APS-C) s objektivem Sigma 4.5mm f/2.8. Před samotnou analýzou fotografií se musí načíst funkce „hemisphere“ a nastavit pracovní adresář obsahující soubor fotografií určených k analýze.

Skript dávkově zpracovává všechny fotografie (ve formátu .jpg) umístěné v cílovém adresáři v několika krocích:

- 1) V prvním kroku jsou načtena obrazová data a doplňující údaje o expozici z EXIF (volitelně) a na základě zadaných parametrů je vypočtena pozice kruhu hemisféry.
- 2) Barevný obraz je převeden na stupně šedé. Výchozí převodník „2BG“ použije rozdíl dvojnásobku hodnoty modrého kanálu a hodnoty zeleného kanálu. Hodnoty jsou následně přeškálovány do intervalu {0,1}
- 3) Hodnoty šedé mohou být korigovány pomocí korekčních faktorů pro vinětaci objektivu při zvolené cloně (načítá se z EXIF informace, pokud není uložena v EXIF, může být zadána ručně).
- 4) Doostření fotografie (volitelný krok) pomocí „shock“ filtru implementovaného ve funkci *imsharpen* z knihovny *imager*, který zvýrazní hrany.
- 5) Uložení fotografie převedené na stupně šedé ve formátu .jpg.
- 6) Klasifikace pixelů oblohy/vegetace. Pomocí algoritmu je vyhledána prahová hodnota pro rozlišení pixelů oblohy a vegetace na základě rozložení hodnot stupňů šedé. Skript aplikuje buď stejnou prahovou hodnotu pro celou fotografii (parametr *zonal=F*), nebo lokálně stanovený práh pro hemisféru rozdělenou na čtyři oblasti podle světových stran (parametr *zonal=T*; výchozí nastavení). Prahová hodnota se na přechodu mezi kvadranty plynule mění díky aplikaci low-pass filtru. Výchozí algoritmus „Intermodes“, implementovaný z knihovny *autothresolder*. Metoda vychází z práce Prewitt, JMS & Mendelsohn, ML (1966): "The analysis of cell images", *Annals of the New York Academy of Sciences* 128: 1035-1053. Metoda předpokládá bimodální histogram. Histogram je iterativně vyhlazen klouzavým průměrem o oknu 3, dokud nenalezne pouze dvě lokální maxima (j,k).

Prahová hodnota je následně stanovena jako $(j+k)/2$. Tato metoda byla testována pro hemisférickou fotografii a poskytovala nejlepší výsledky z testovaných metod (viz Glatthorn J. & Beckschäfer P., 2014: Standardizing the protocol for hemispherical photographs: Accuracy assessment of binarization algorithms. PLoS ONE 9: 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111924>).

Pokud je potřeba upravit automaticky stanovenou prahovou hodnotu, lze zadat korekční faktor (parametr *adjust.thr*), který posune prahovou hodnotu pro faktor >1 směrem k vyšším hodnotám (tj. více pixelů bude klasifikováno jako vegetace), pro faktor <1 k nižším hodnotám (více pixelů bude klasifikováno jako obloha).

Klasifikovaný obraz je uložen ve formátu .png v podadresáři /threshold s příponou obsahující informaci o zvolené prahovací metodě, korekčním faktoru a zvolené prahové hodnotě.

Pokud je požadována diagnostická fotografie (save.diag = T), uloží se i prolnutí klasifikovaného obrazu (pixelů oblohy jsou znázorněny červenou barvou) s obrazem ve stupních šedé a s vyznačenou pozicí kruhu hemisféry.

7) V posledním kroku je vypočtena hodnota stromového zápoje za použití informace o zkreslení objektivu pro zvolený maximální zenitový úhel. Pro objektiv typu equisolid-angle (též equal-area) platí, že v ideálním případě odpovídá jednotková obrazová plocha jednotkovému prostorovému úhlu na hemisféře. Projekční vztah mezi vzdáleností od obrazového středu a zenitovým úhlem je pro tento typ objektivu:

$$r = 2f \sin(\theta / 2)$$

kde f je ohnisková vzdálenost a θ je obrazový úhel od optické osy objektivu (zde zenitový úhel).

Objektiv Sigma se této projekci blíží, zjištěný vztah pro tento objektiv je:

$$r = 2f \sin(\theta / 1.997)$$

V případě použití jiného objektivu se známým projekčním parametrem lze tuto hodnotu zadat (výchozí nastavení je *lens.prj* = 1.997). Na základě zkreslení objektivu je přepočítána váha jednotlivých pixelů odpovídající prostorovému úhlu ve skutečnosti. Hodnota celkové otevřenosti zápoje (canopy openness) je součtem přepočtených vah pixelů klasifikovaných jako obloha. Volitelně lze zadat i více zenitových úhlů použitých pro výpočet canopy openness.

Celý výše popsáný proces je zahrnut ve funkci „hemisphere“ s následujícími parametry funkce:

'img' jméno souboru fotografie (včetně cesty, pokud není nastaven pracovní adresář do složky s fotografiemi)

'camera' výrobce fotoaparátu, pro "Canon" je automaticky nastaven poloměr hemisféry na 0.425 a pro "Nikon" na 0.3975

'radius' (volitelné, přepíše výchozí hodnoty pro výrobce) poloměr kruhu hemisféry (relativně vůči kratší straně (výšce) fotografie), 0.423 pro Canon (crop factor 1.6x), 0.42708 pro Nikon (crop factor 1.5x)

'shift' posun středu (relativně) vůči délce strany v daném směru, zadává se posun na osách: c(x,y)

'method' určuje způsob míchaní kanálů pro převod na stupně šedé

method = 2BG (default, zesvětlit modrou, ztmavit zelenou) # gray = $2*B - 1*G$

method = RGB (všechny kanály stejně) # gray = $(1*R + 1*G + 1*B)/3$

method = GLA (green leaf algorithm) # gray = $(2*G - 1*G - 1*B)/(2G + R + B)$

method Luma (přirozená luminance, odpovídá lidskému vnímání) # gray = $0.3 * R(im) + 0.59 * G(im) + 0.11 * B(im)$

'thr.method' - algoritmus použitý pro výpočet prahové hodnoty

- default: thr.method = "Intermodes"

'adjust.thr' korekční parametr pro úpravu automatického prahu, pro čísla > 1 posune práh k vyšším hodnotám (více pixelů bude klasifikováno jako vegetace), použít pro korekci v případě selhání automatického určení prahování

'zonal' použít zonální prahování (zonal = T) nebo globální prahování (zonal = F)

'zenith' zenitové úhly (ve stupních) pro výpočet Canopy Openness (výchozí zenith=c(10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90))

'sharpen' doostřit fotografii (sharpen = T)

'vign' korigovat vinětaci (vign = T)

'f' clonové číslo (použije se, pokud není nastaveno v Exif)

'save.bw' uložit prahovanou fotografii? (save.bw = T)

'save.gray' uložit fotografii ve stupních šedé? (save.gray = T)

'save.diag' uložit diagnostickou fotografii? (save.diag = T)

'lens.prj' konstanta x projekční funkce objektivu: $r = \sin(\alpha/x)$, pro objektivy s equisolid projekcí má být $x = 2$ (reálně pro Sigma 4.5mm $x = 1.997$)

Funkce vrací tabulku hodnot canopy openness pro zvolené zenitové úhly a ukládá prahované fotografie pro možnost dalšího zpracování ve specializovaných programech (pro odvození dalších strukturních parametrů a radiace v porostu).

Příklad volání funkce:

```
#nacist skript HemisphereR (cestu k souboru upravte reality)
source("C:/Data/R/HemisphereR.R")

#nastavit pracovní adresar s hemisferickými fotografiemi k analýze
hemi.dir <- "X:/MIKROKLIMA/NP_Sumava_a_Bavorsky_les/Hemi/201910/"
setwd(hemi.dir)

#nacist názvy souboru
hemi.foto <- list.files(hemi.dir,pattern=".jpg",ignore.case=T)

#nacte všechny .jpg soubory v adresari včetně plné cesty
hemi.foto.full <-
list.files(hemi.dir,pattern="\\.jpg",full.names=T,ignore.case=T)

#nastavení parametru funkce
camera      = "Canon"
radius      = NA
shift       = c(0,0)
method      = "2BG"
thr.method  = "Intermodes"
zonal       = T
adjust.thr  = 1
zenith      = 90
sharpen     = F
vign        = T
f           = 8
lens.prj    = 1.997
save.gray   = T
save.bw     = T
save.diag   = T

#uložit nastavení to souboru settings_Hemisphere.csv
write.table(t(data.frame(camera=camera,radius = radius,shift.x =
shift[1],shift.y = shift[2],method = method,thr.method =
thr.method,zonal=zonal,adjust.thr =
adjust.thr,sharpen=sharpen,vign=vign,default.f =
f,lens.prj=lens.prj,save.gray = save.gray,save.bw = save.bw,save.diag =
save.diag)), "settings_Hemisphere.csv", row.names=T, col.names = F, sep=";")

#zpracuje postupně jednotlivé hemisferické fotografie, výsledky průběžně
ukládá do objektu „CO“
for(i in 1:length(hemi.foto)) {
  if(!exists("CO")) {CO = hemisphere(hemi.foto[i],camera=camera,radius =
radius,shift = shift,method = method,thr.method =
thr.method,zonal=zonal,adjust.thr = adjust.thr,zenith =
zenith,sharpen=sharpen,vign=vign,f = f,lens.prj=lens.prj,save.gray =
save.gray,save.bw = save.bw,save.diag = save.diag)}
  else {try(CO <- rbind(CO, hemisphere(hemi.foto[i],camera=camera,radius
= radius,shift = shift,method = method,thr.method =
thr.method,zonal=zonal,adjust.thr = adjust.thr,zenith =
zenith,sharpen=sharpen,vign=vign,f = f,lens.prj=lens.prj,save.gray =
save.gray,save.bw = save.bw,save.diag = save.diag)), silent=T)}
  save(CO,file="CO.R")
}

#save results
write.table(CO,"Results_Canopy_Openness.csv", sep=";", row.names=F)
```



[poslední strana]